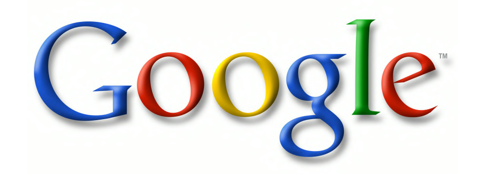
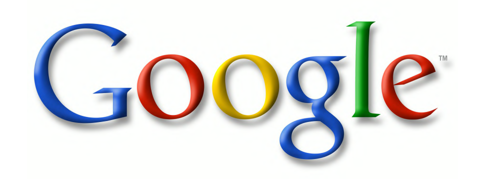




Exposition d'Appareils Scientifiques

LONDRES. 1876.



MUSÉE DE SOUTH KENSINGTON.



GUIDE THÉORIQUE

POUR L'EXPOSITION D'APPAREILS SCIENTIFIQUES
DU MUSÉE DE SOUTH KENSINGTON
LONDRES, 1876

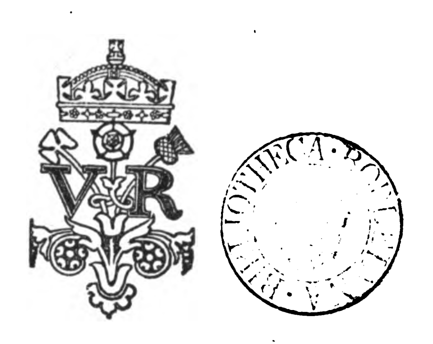
GUIDE THÉORIQUE

POUR

L'EXPOSITION D'APPAREILS SCIENTIFIQUES

DU MUSÉE DE SOUTH KENSINGTON

1876



Préparé à la Requête des Lords du Conseil d'Éducation

LIBRAIRIE HACHETTE ET Cie.

PARIS : 79, BOULEVARD SAINT-GERMAIN
LONDON : 18, KING WILLIAM STREET, CHARING CROSS

LONDRES :
IMPRIMERIE DE VIRTUE ET CIE., (LIMITED),
CITY ROAD.

TABLE DES MATIÈRES.

INTRODUCTION.

Par arrêté en date du 22 janvier 1875, les lords du Comité du Conseil d'Éducation ont approuvé la proposition d'organiser une exposition d'appareils scientifiques, destinée à renfermer, non-seulement des appareils propres à l'enseignement et aux recherches de la science, mais aussi des instruments présentant un intérêt historique, soit par le fait des savants qui les ont employés, soit par les travaux auxquels ils ont servi. Leurs seigneuries ont ensuite invité quelques-uns des principaux hommes de science d'Angleterre, présidents de sociétés savantes, et autres, à se constituer en comité pour approfondir le sujet et pour les seconder de leurs avis. Ce comité, à l'activité duquel l'exécution du projet est due dans une si grande mesure, était composé comme suit :

Le Lord Chancelier.
Le professeur F. A. Abel, F.R.S., Président de la Société de Chimie.
Lord Aberdare, Président de la Société d'Horticulture.
Le capitaine W. de W. Abney, R.E.
Le professeur H. W. Acland, M.D., F.R.S., Président du Conseil Médical du Royaume-Uni.
Le professeur J. C. Adams, M.A., F.R.S.
Le professeur W. G. Adams, M.A., F.R.S.
Sir G. B. Airy, K.C.B., D.C.L., F.R.S., Astronome Royal.
Dr. G. J. Allman, F.R.S., Président de la Société Linnéenne.
M. J. Anderson, LL.D., C.E.
M. D. T. Ansted, M.A., F.R.S.
Le professeur E. Atkinson, Ph.D.
Le professeur R. Stawell Ball, LL.D., F.R.S.
Le professeur W. F. Barrett.
Le révérend A. Barry, D.D.
M. W. B. Baskcomb.
M. H. Bauerman.
M. G. Bentham, F.R.S.
M. Hugh Birley, M.P.
Le professeur Bloxam.
Le major Bolton.
Le professeur F. A. Bradley.

M. F. J. Bramwell, F.R.S.
M. T. Brassey, M.P.
M. H. W. Bristow, F.R.S.
M. C. Brooke, M.A., F.R.S.
M. G. Busk, F.R.S.
Le major-général Cameron, C.B., F.R.S.
Dr. W. B. Carpenter, C.B., F.R.S.
M. C. O. F. Cator.
M. W. Chappell.
M. H. W. Chisholm, Gardien des types des poids et mesures.
Lord Alfred Churchill, Président du Conseil de la Société des Arts.
M. G. T. Clark.
M. Latimer Clark.
Le professeur R. Bellamy Clifton, M.A., F.R.S.
Sir Henry Cole, K.C.B.
Vice-amiral Sir R. Collinson, K.C.B., Député-maître de Trinity House.
Dr. Debus, F.R.S.
M. Warren de la Rue, D.C.L., F.R.S.
M. G. Dixon, M.P.
Le professeur P. M. Duncan, M.B., F.R.S., Président de la Société Géologique.
Le professeur W. T. Thiselton Dyer, M.A., B.Sc.
Le major-général F. Eardley-Wilmot, R.A., F.R.S.
M. H. S. Eaton, Président de la Société Météorologique.
Sir P. de M. G. Egerton, M.P., F.R.S.
M. R. Etheridge, F.R.S.
Le capitaine Evans, R.N., C.B., F.R.S., Hydrographe de la Marine.
M. J. Evans, F.R.S.
Le professeur W. H. Flower, F.R.S.
M. D. Forbes, F.R.S.
Le professeur G. Carey Foster, B.A., F.R.S., Président de la Société de Physique.
Le professeur Michael Foster, M.D., F.R.S.
Le colonel Lane Fox, Président de l'Institut d'Anthropologie.
Le professeur Frankland, Ph.D., D.C.L., F.R.S.
M. A. H. Garrod, M.A.
Dr. Gilbert, F.R.S.
Dr. J. H. Gladstone, F.R.S.
M. D. Glasgow.
Le professeur Goodeve, M.A.
M. A. C. L. G. Günther, M.A., M.D., F.R.S.
Le professeur Guthrie, Ph.D., F.R.S.
M. J. Baillie-Hamilton.
Lord Hampton, G.C.B., F.R.S., Président de l'Institut d'Architecture Navale.
M. T. E. Harrison, Président de l'Institut des Ingénieurs civils.
Sir J. Hawkshaw, F.R.S.
M. T. Hawksley, Président de l'Institut des Ingénieurs-mécaniciens.
M. Alan Herbert.
M. J. Hick, M.P.
Dr. J. D. Hooker, C.B., Président de la Société Royale.
M. J. Hopkinson, B.A., D.Sc.
M. W. Huggins, D.C.L., F.R.S., Président de la Société Royale d'Astronomie.
Le professeur W. Hughes.
Le professeur T. H. Huxley, LL.D., Secrétaire de la Société Royale.
Le lieutenant-général sir H. James, R.E., F.R.S.
Le révérend J. H. Jellett, B.D.
Le professeur E. Ray Lankester, M.A., F.R.S.
Lord Lindsay, M.P.
M. J. Norman Lockyer, F.R.S.
Le révérend R. Main, M.A., F.R.S.
Dr. R. J. Mann.
M. N. Story-Maskelyne, M.A., F.R.S.

Le professeur J. Clerk-Maxwell, M.A., F.R.S.
M. C. W. Merrifield, F.R.S.
Le professeur Miller, M.A., LL.D., F.R.S.
Le professeur Morris.
M. A. J. Mundella, M.P.
Le professeur Odling, M.A., F.R.S.
M. W. K. Parker, F.R.S.
Dr. Percy, F.R.S.
M. J. A. Phillips.
M. Lyon Playfair, C.B., M.P., F.R.S.
Dr. Pole, F.R.S.
Le professeur Prestwich, F.R.S.
Le professeur A. C. Ramsay, LL.D., F.R.S.
Sir H. C. Rawlinson, K.C.B., F.R.S., Président de la Société Royale de Géographie.
Lord Rayleigh, F.R.S.
Le professeur A. W. Reinold, M.A.
Le professeur Roscoe, Ph.D., F.R.S.
Le comte de Rosse, D.C.L., F.R.S.
M. G. W. Royston-Pigott, M.A., M.D., F.R.S.
M. J. Scott-Russell, F.R.S.
Dr. W. J. Russell, F.R.S.
Le professeur W. Rutherford, M.D.
M. B. Samuelson, M.P.
Le professeur J. S. Burdon-Sanderson, M.D., F.R.S.
M. T. Savage, M.A.
M. R. H. Scott, M.A., F.R.S.
Le major Seddon, R.E.
Le professeur Shelley.
Sir J. P. Kay-Shuttleworth.
M. C. W. Siemens, D.C.L., F.R.S.
Le professeur H. J. S. Smith, M.A., F.R.S.
M. W. Warington Smyth, M.A., F.R.S.
M. H. C. Sorby, F.R.S., Président de la Société Royale de Microscopie.
M. W. Spottiswoode, M.A., Trésorier de la Société Royale.
M. G. R. Stephenson.
Le professeur Balfour Stewart, LL.D., F.R.S.
Dr. W. H. Stone.
Le major-général Strachey, C.S.I., F.R.S.
Le lieutenant-colonel Strange, F.R.S.
Le professeur P. G. Tait, M.A.
M. J. Torr, M.P.
Le révérend J. F. Twisden, M.A.
Le professeur Tyndall, LL.D., F.R.S.
Le professeur W. C. Unwin, B.Sc.
M. C. V. Walker, F.R.S., Président de la Société des Ingénieurs-télégraphistes.
M. F. H. Wenham.
Sir C. Wheatstone, F.R.S. (récemment décédé)
Sir J. Whitworth, F.R.S.
Le professeur Williamson, Ph.D., F.R.S.
M. Bennet Woodcroft, F.R.S.
Dr. J. Woolley.
Le colonel H. Stuart-Wortley.

Le première séance du comité a eu lieu le 13 février 1875; le nombre des membres présents démontrant d'emblée l'intérêt qu'excitait le projet. Le lord président du Conseil, Duc de Richmond, et son vice-président, Vicomte Sandon, en expliquant le but de l'entreprise, profitèrent de l'occasion pour rappeler les recommandations de la Commission Royale d'Instruction Scientifique, concernant la création d'un Musée de la Science.

Leurs seigneuries énoncèrent leur conviction, que le département de l'Éducation, et quelques autres appartenant au Musée de South Kensington, agrandis sous une forme analogue à celle du *Conservatoire des Arts et Métiers* de Paris et à d'autres établissements semblables sur le Continent, contribueraient à l'avancement de la science et seraient d'une grande utilité au progrès industriel de l'Angleterre. Tout en exprimant l'espérance que l'exposition pourrait contribuer à atteindre ce but, leurs seigneuries eurent soin de ne point engager le gouvernement de sa Majesté en faveur d'un plan défini quelconque, les vues du Ministère n'étant point encore fixées.

Sur la proposition du Dr. Hooker, président de la Société Royale, il fut reconnu à l'unanimité, qu'une exposition du genre de celle qui était en projet, serait des plus instructives et utiles.

Après discussion, plusieurs sous-comités furent constitués pour fixer la répartition des "appareils scientifiques" appartenant aux sections respectives, en ayant égard à l'espace disponible dans le musée.

Ces sections furent ainsi désignées :

1° Mécanique (comprenant les mathématiques pures et appliquées) ;
2° Physique ;
3° Chimie (comprenant la métallurgie) ;
4° Géologie, Minéralogie, et Géographie ;
5° Biologie.

Après de nombreuses réunions, les sous-comités firent rapport au Comité général le 12 mai sur la question de classification, et les différents projets furent renvoyés à une commission spéciale formée de trois membres pris dans chaque sous-comité. Il fut aussi résolu de retarder l'ouverture de l'exposition, qui, fixée d'abord au mois de juin 1875, fut renvoyée en mars 1876. Le

grand nombre d'envois de l'étranger et l'époque tardive de leur arrivée a nécessité un renvoi ultérieur à mai 1876.

La commission nommée pour examiner à nouveau la question de classification, après trois délibérations, sous la direction du président de la Société Royale, proposa un plan de classement au Comité général le 22 juin. Ce plan, après un examen approfondi, fut approuvé avec quelques légères modifications. Il fut aussitôt publié, et la classification en sections qu'il renferme, est celle qui a été adoptée pour le catalogue et pour l'exposition, quoique la disposition des salles ait nécessité quelques changements dans l'ordre des sections.

D'emblée le projet avait existé de donner à l'exposition un caractère international, afin de procurer aux hommes de science, et à ceux qui s'occupent d'éducation, l'occasion de voir ce qui était fait dans d'autres pays pour la fabrication d'instruments, soit d'étude, soit d'enseignement ; occasion qui pourrait profiter aussi, on l'espérait, aux fabricants. Dès que le programme eut été définitivement arrêté, des mesures furent prises pour intéresser à l'exposition les pays étrangers, et il fut résolu d'acquérir la coopération de savants du Continent, qui agissant comme membres du Comité général, formeraient des commissions spéciales chargées de représenter l'activité scientifique de leurs pays respectifs.

Des précautions particulières durent être prises pour éviter tout malentendu à l'égard du caractère de l'exposition. La qualité d'internationale pouvait la faire assimiler aux expositions industrielles qui ont eu lieu dans divers pays. Une idée erronée à cet égard aurait pu entraîner de sérieux inconvénients.

Dans les expositions internationales un certain espace est accordé à chaque pays. Ces espaces sont ensuite répartis par les commissaires de ces pays entre leurs divers exposants, qui distribuent leurs produits selon certaines règles pour les faire valoir au mieux, tout en en conservant la garde. Les frais de transport, d'arrangement, etc., sont supportés par les pays qui

exposent, et les expositions s'adressent naturellement, plus ou moins exclusivement, aux intérêts industriels ou commerciaux de ces pays.

Toute autre était l'idée présidant à l'exposition projetée à South Kensington. On désirait y rassembler, non-seulement des appareils et des objets manufacturés, mais aussi des pièces d'intérêt historique, conservées dans des musées ou par des particuliers comme des reliques vénérées, et en outre des appareils aujourd'hui en usage dans les laboratoires. Le transport de tous les objets a été effectué aux frais du gouvernement anglais, et leur garde et leur arrangement ont été confiés au Département de Science et d'Art, qui s'est tenu strictement au classement adopté.

Lorsque le but de l'entreprise eut été parfaitement défini et compris, le Comité du Conseil d'Éducation reçut les réponses les plus satisfaisantes à ses invitations, transmises officiellement par les agents du ministère des affaires étrangères. Les ministres de sa Majesté à Paris, Berlin, Saint-Pétersbourg, Vienne, Florence, Bruxelles, La Haye, Stockholm, Madrid, Berne, et Washington s'y sont personnellement intéressés, et les gouvernements étrangers ont facilité et encouragé cette pensée tout à fait internationale. La liste suivante des membres étrangers du Comité général en témoigne elle-même, par la distinction et la réputation européenne des noms qu'elle renferme.

BELGIQUE.

M. Stas, Membre de l'Académie Royale (Président).

Le général Brialmont, Président de l'Académie Royale et Inspecteur-général du Génie.

M. Dewalque, Membre de l'Académie Royale, Professeur de Géologie et de Minéralogie à l'Université de Liége.

M. Maus, Membre de l'Académie, Inspecteur-général des Ponts et Chaussées.

M. Plateau, Membre de l'Académie Royale, F.R.S.

M. Schwann, Membre de l'Académie Royale, Professeur à l'Université de Liége.

M. Van Beneden, Membre de l'Académie et Professeur à l'Université de Louvain, F.R.S.

Le général Liagre, Secrétaire perpétuel de l'Académie Royale, et Commandant et Directeur des Études de l'École Militaire (Secrétaire).

FRANCE.

Le général Arthur-Jules Morin, Membre de l'Académie des Sciences, Directeur du Conservatoire des Arts et Métiers (Président).

M. Alex.-Edmond Becquerel, Membre de l'Académie des Sciences, Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers, F.R.S.

M. Henri-Marie Bouley, Membre de l'Académie des Sciences, Inspecteur-général des Écoles Vétérinaires.

M. Gabriel-Auguste Daubrée, Membre de l'Académie des Sciences, Directeur de l'École des Mines.

M. Jean-Louis Armand de Quatrefages de Bréau, Membre de l'Académie des Sciences, Professeur au Muséum d'Histoire Naturelle.

M. Jean-Baptiste Dumas, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, F.R.S.

M. Hervé-Auguste-Étienne-Albans Faye, Membre de l'Académie des Sciences, Président du Bureau des Longitudes.

M. Edmond Frémy, Membre de l'Académie des Sciences, Professeur au Muséum d'Histoire Naturelle.

M. Jules-Célestin Jamin, Membre de l'Académie des Sciences, Professeur à l'École Polytechnique.

M. Urbain-Jean-Joseph Le Verrier, Membre de l'Académie des Sciences, Directeur de l'Observatoire, F.R.S.

M. Eugène-Melchior Péligot, Membre de l'Académie des Sciences, Directeur des Essais à la Monnaie.

M. Henri-Édouard Tresca, Membre de l'Académie des Sciences, Sous-Directeur du Conservatoire des Arts et Métiers (Secrétaire).

ALLEMAGNE.

I.—Comité de Berlin.

Dr. A. W. Hofmann, Professeur de Chimie, F.R.S. (Président).

Dr. Beyrich, Professeur de Géologie.

Dr. du Bois-Reymond, Professeur de Physiologie.

Dr. Dove, Professeur de Physique, F.R.S.

Dr. Förster, Directeur de l'Observatoire.

Dr. Hagen, Président des Ponts et Chaussées.

M. T. G. Halske, Ingénieur-télégraphiste.

Dr. Hauchecorne, Directeur de l'École des Mines.

Dr. Helmholtz, Professeur de Physique, F.R.S.

Dr. Kiepert, Professeur de Géographie.

Dr. G. Kirchhoff, Professeur de Physique, F.R.S.

Dr. Kronecker, Professeur de Mathématiques.

Dr. C. D. Martius, Chimiste.

Le général Von Morozowicz.

Dr. Neumayer, Hydrographe à l'Amirauté impériale.

Dr. Reuleaux, Directeur de l'Académie Polytechnique.

Dr. Schellbach, Professeur de Mathématiques.

Dr. W. Siemens, Ingénieur-télégraphiste.
Dr. Virchow, Professeur de Pathologie.
Dr. C. H. Vogel, Astronome.
Dr. Websky, Professeur de Minéralogie.

II.—Comité représentant d'autres Villes d'Allemagne.

Dr. Von Babo, Professeur de Chimie, Fribourg.
Dr. Beetz, Professeur de Physique, Munich.
Dr. Buff, Professeur de Physique, Giessen.
Dr. Clausius, Professeur de Physique, Bonn, F.R.S.
Son excellence le Dr. von Dechen, Directeur des Mines, Bonn.
Dr. von Fehling, Professeur de Chimie, Stuttgart.
Dr. von Feilitzsch, Professeur de Physique, Greifswald.
Dr. Graebe, Professeur de Chimie, Königsberg.
Dr. von Groddeck, Directeur de l'École des Mines, Klausthal.
Dr. Heeren, Professeur de Chimie, Hanovre.
Dr. Hittorf, Professeur de Chimie, Münster.
Dr. Karsten, Professeur de Physique, Kiel.
Dr. Karsten, Professeur de Physique, Rostock.
Dr. Knapp, Professeur de Chimie, Brunswick.
Dr. Knoblauch, Professeur de Physique, Halle.
Dr. Kölliker, Professeur de Physiologie, Wurtzbourg, F.R.S.
Dr. Kundt, Professeur de Physique, Strasbourg.
Dr. Launhardt, Directeur de l'École Polytechnique, Hanovre.
Dr. Möhl, Cassel.
Dr. Poleck, Professeur de Chimie, Breslau.
Dr. Preyer, Professeur de Physiologie, Iéna.
Dr. von Quintus-Icilius, Professeur de Physique, Hanovre.
Dr. Reusch, Professeur de Physique, Tübingue.
Dr. Romberg, Professeur à l'École de la Marine, Brême.
Dr. Rosenthal, Professeur de Physiologie, Erlangen.
Dr. Rümker, Directeur de l'Observatoire, Hambourg.
Dr. Serlo, Directeur des Mines, Breslau.
Dr. C. von Siemens, Professeur à l'Académie d'Agriculture, Hohenheim.
Son excellence le Dr. von Steinbeis, Président, Stuttgart.
Dr. W. Weber, Professeur de Physique, Göttingue, F.R.S.
Dr. Wiedemann, Professeur de Chimie physique, Leipsig.
Dr. Winkler, Professeur de Métallurgie, Fribourg.
Dr. Wöhler, Professeur de Chimie, Göttingue, F.R.S.
Dr. Wüllner, Professeur de Physique, Aix-la-Chapelle.
Dr. Zeuner, Directeur de l'École Polytechnique, Dresde.
Dr. Zetzsche, Directeur de l'École Polytechnique, Chemnitz.

ITALIE.

Il Com. Blaserna, Professeur de Physique, Recteur de l'Université Royale, Rome.

Il Com. Cantoni, Professeur de Physique à l'Université Royale de Pavie.

Il Cav. L. Respighi, Professeur d'Astronomie à l'Université Royale, Rome; Directeur de l'Observatoire du Capitole.

PAYS-BAS.

Le professeur Dr. P. L. Rijke, Conseiller d'État (Président).

Le professeur Dr. H. G. de Sande Bakhuyzen.

Le professeur Dr. C. H. D. Buys Ballott.

Le professeur Dr. J. Bosscha.

Le professeur Dr. F. C. Donders, F.R.S., Président de l'Académie Royale des Sciences, Amsterdam.

Le professeur Dr. J. W. Gunning.

Le professeur Dr. R. A. Mees.

Le professeur Dr. V. S. M. van der Willigen.

Le Dr. D. de Loos, Directeur de l'École secondaire de la Ville de Leyde (Secrétaire).

NORVÉGE.

Le professeur Esmark.

Herr Mohn, Directeur de l'Institut météorologique de Norvége.

Le professeur Waage.

RUSSIE.

M. Struve, Conseiller Privé, Directeur de l'Observatoire Central Nicolas (Président).

M. Ovsiannikow, Membre de l'Académie.

M. Gadolin, Membre de l'Académie.

M. Gruber, Professeur à l'Académie de Médecine et de Chirurgie.

M. Stubendorf, Colonel d'État-major.

M. Wyschnegradsky, Professeur à l'Institut technologique.

M. Beilstein, Professeur à l'Institut technologique.

M. Barbot de Marny, Professeur à l'Institut des Mines.

M. Koulibine, Professeur à l'Institut des Mines.

SUISSE.

Le professeur E. Wartmann (Président).

Le professeur J. Amsler-Laffon.

Le professeur D. Colladon-Ador.

Le professeur Dr. E. Hagenbach-Bischoff.

Le professeur F. A. Forel.

Le professeur Ad. Hirsch.

Le professeur Albert Mousson.

M. E. Sarasin-Diodati.

Le professeur L. Soret.

Le colonel E. Gautier (Secrétaire).

AUTRICHE ET HONGRIE.

Le ministre de l'Instruction publique a désigné M. le chef de section Fidler pour organiser les envois de ces pays.

ESPAGNE.

Aucun comité n'a été formé, mais le Gouvernement a promis de contribuer à l'Exposition, et M. Riano a été spécialement chargé de pourvoir aux arrangements.

ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE.

Le Gouvernement a répondu, par l'entremise de M. Fish, qu'il entrait en relation avec les divers départements et institutions scientifiques afin de s'occuper de l'Exposition.

Lorsque des hommes de cette valeur dans toutes les branches de la science ont donné leur adhésion au programme d'une exposition de cette espèce, son succès peut bien être considéré comme assuré. Mais ces messieurs n'ont pas seulement donné leur nom pour marquer le prix qu'ils y attachaient, il n'ont épargné ni temps ni peine pour lui procurer une complète réussite. En les remerciant de leurs services, les lords du Conseil d'Éducation sont certains d'être les interprètes, non-seulement de leurs propres sentiments, mais de la reconnaissance de leur pays tout entier.

On comprend aisément, par ce qui précède sur la nature, le but et les bases de l'exposition, qu'un état-major nombreux a dû être ajouté au personnel permanent du musée, pour organiser et arranger les envois pendant le temps très-limité accordé à ces fins. Des mesures spéciales ont été prises, et leurs seigneuries se font un plaisir de rappeler ici les noms de ceux qui leur ont rendu dans ce travail de très-importants services, en assistant le personnel du musée, plusieurs volontairement, dans ses difficiles fonctions. Ce sont MM. le capitaine Abney, le Dr. Atkinson, Bartlett, le Dr. Brunton, le Dr. Biedermann, le professeur Crum-Brown, le capitaine Fellowes, le professeur Carey-Foster, le Dr. Michael Foster, Kirchner, le professeur Goodeve, le Dr. Guthrie,

le commandant T. A. Hull, Iselin, Judd, N. Lockyer, le Dr. R. J. Mann, Clements Markham, le professeur H. McLeod, le professeur Roscoe, le professeur Shelley, le Dr. Burdon-Sanderson, le Dr. Schuster, le Dr. Voit et R. Wylde.

Les lords du Comité du Conseil d'Éducation ont la conviction que les plus sincères remercîments sont dus à tous ces hommes de science, qui ont consacré beaucoup de leur temps pour seconder l'entreprise et l'œuvre des divers comités, et qui leur ont apporté le précieux concours de leur savoir et de leur expérience, et ils ont la confiance que le succès immédiat et futur de l'exposition, résultat de leurs labeurs, les récompensera du zèle qu'ils y ont apporté.

Afin de rendre l'exposition aussi utile et intéressante que possible, un Guide contenant des notices explicatives pour chaque section a été préparé. Leur rédaction a eu la bonne fortune de pouvoir être confiée aux auteurs suivants, dont la capacité bien connue donne au livre le caractère désiré. Ce sont messieurs :

Le capitaine W. de W. Abney.
Le professeur W. Kingdon Clifford, M.A., F.R.S.
Le capitaine J. E. Davis.
Le professeur G. Carey-Foster, B.A., F.R.S.
Le professeur Geikie, F.R.S.
Le professeur Goodeve, M.A.
Le professeur Guthrie, F.R.S.
Le professeur T. H. Huxley, LL.D., F.R.S.
Le professeur McLeod.
J. Norman Lockyer, F.R.S.
Clements R. Markham, C.B., F.R.S.
N. Story Maskelyne, M.A., F.R.S.
Le professeur J. Clerk-Maxwell, M.A., F.R.S.
R. H. Scott, M.A., F.R.S.
Le professeur H. J. S. Smith, M.A., F.R.S.
Le professeur W. Warington Smyth, M.A., F.R.S.
H. C. Sorby, F.R.S.
W. Spottiswoode, M.A., F.R.S.
Le professeur P. G. Tait, M.A.

Il avait été proposé à l'origine de placer l'exposition dans le musée de South Kensington, mais diverses circonstances imprévues ayant rendu la chose impossible, les commissaires de sa Majesté pour l'exposition de 1851 ont très-libéralement mis à la disposition du Département de Science et d'Art les galeries de

l'aile occidentale des jardins d'Horticulture. Quoique, malheureusement, ces galeries ne soient pas contiguës au musée de Kensington, elles sont admirablement adaptées à leur usage actuel et elles favorisent des arrangements qui n'auraient pu être obtenus d'une autre façon.

(Par ordre)

F. R. SANDFORD,
Secrétaire du Comité du Conseil d'Éducation.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

SUR LES

APPAREILS SCIENTIFIQUES.

1.—Des Expériences.

Le but des sciences physiques est d'observer et d'interpréter les phénomènes naturels. Quelques-uns d'entre eux, par exemple en astronomie, échappent à notre contrôle direct et nous en sommes réduits à les étudier par l'observation. C'est seulement lorsque nous pouvons reproduire le phénomène sous nos yeux, dans des conditions déterminées, que nous sommes en possession du moyen de recherche le plus puissant, l'Expérience.

Une expérience en elle-même n'est qu'un phénomène naturel, mais dans lequel l'observateur a disposé toutes les circonstances, de manière à mettre en lumière les relations qu'ont entre eux certains faits particuliers.

Dans la préparation d'une expérience, l'on doit toujours avoir soin de distinguer de tous les autres, les agents et les phénomènes que l'on veut étudier, et qui forment le champ de l'investigation. Tous les autres sont des causes de perturbation et d'inexactitude; l'observateur doit s'attacher à rendre leur influence aussi faible que possible.

Le champ d'investigation pourra plus tard être étendu de façon à comprendre ces phénomènes, qui d'abord n'étaient que des éléments perturbateurs. Le mode d'expérimentation devra être modifié en conséquence, et lorsqu'on aura ainsi determiné les lois

qui régissent les causes perturbatrices, on aura dans la main de nouvelles données, facilitant une étude complète et plus exacte des phénomènes qui avaient, de prime abord, été considérés comme les plus importants.

Lorsque, par exemple, on cherchera à découvrir ou à mesurer une force par le moyen du mouvement qu'elle imprime à un corps, le frottement sera une cause d'erreur, et l'expérience devra être disposée de façon à en diminuer l'effet le plus possible.

2.—Des Appareils.

On désigne sous le nom d'*appareils* tous les objets dont un observateur a besoin pour effectuer une expérience, et plus spécialement sous le nom d'*instrument* un appareil particulier fabriqué en vue d'une certaine expérience.

Un appareil peut être destiné à produire et à mettre en évidence un phénomène naturel, ou à diminuer l'action des causes perturbatrices, ou à régulariser les conditions physiques du phénomène, ou bien à en mesurer l'intensité.

Dans bien des cas chacun de ces buts particuliers nécessite un appareil spécial ; mais, en revanche, certains appareils sont utilisés dans un grand nombre d'expériences, et il existe des séries nombreuses d'instruments dont la construction repose sur les mêmes principes.

Par exemple, dans tous les instruments dans lesquels un mouvement doit être produit, on doit rencontrer, d'abord, un moteur, puis un mécanisme destiné à relier le moteur avec le corps qui doit être mis en mouvement ; souvent il faudra y ajouter, ou bien un frein pour limiter l'énergie du moteur, ou bien un réservoir où cette énergie puisse s'accumuler lorsqu'elle n'est pas utilisée ; on aura aussi souvent recours à des moyens spéciaux pour mesurer la force transmise, la vitesse acquise, le travail produit, ou pour les régulariser automatiquement.

Des appareils empruntés à d'autres branches des sciences physiques telles que l'électricité, la chaleur, la lumière, l'acous-

tique, etc., nous offriraient des classifications semblables dans les effets qu'ils produisent.

3.—Principes généraux de la Construction des Appareils.

Certaines conditions générales communes à tous les instruments doivent en première ligne attirer notre attention. Il faut avant tout qu'ils soient bien appropriés au but que l'on poursuit; que les pièces qui doivent demeurer fixes soient absolument immobiles; que celles, au contraire, destinées à se mouvoir soient bien libres; que celles qui servent directement à l'observation ne soient pas masquées ou mal éclairées; que les pièces enfin qui doivent avoir une certaine forme définie ne soient pas défigurées par les flexions, les efforts qu'elles subissent, ou simplement par leur usure.

Avant donc d'entrer dans la classification des instruments d'après le genre de phénomènes dont ils doivent faciliter l'étude, il convient d'exposer quelques-uns des principes généraux qui président à leur construction.

Toute partie solide dans un instrument doit être fixe ou mobile et offrir une certaine forme définie. La pesanteur et d'autres agents agissent nécessairement sur elle, mais elle ne doit pas être soumise à des efforts inutiles qui non-seulement pourraient nuire à sa solidité, mais encore (inconvénient plus grave au point de vue scientifique) modifier sa forme et jeter du trouble dans les observations.

Nous devons donc rechercher les meilleurs moyens de *soulager* les parties d'un instrument de tout effort inutile, de maintenir les parties fixes dans une position déterminée, et d'assurer le mouvement régulier et sans secousses des pièces mobiles.

On atteindra ces résultats en se basant sur le principe bien connu en cinématique, que *tout corps rigide a six degrés de liberté.*

Un corps rigide est un corps dont la forme est invariable. Les pièces qui composent nos instruments sont solides sans être véritablement rigides. Elles sont sujettes à changer de forme par

suite des efforts qu'elles subissent ; mais ces changements de forme ne sont pas utiles, sauf dans certains organes spéciaux tels que les ressorts.

Lorsqu'une pièce solide est gênée dans plus de six directions, elle devient par conséquent le siége d'un effort interne, et il en résulte une compression ou une torsion dont il serait difficile de préciser les effets sans avoir recours aux mesures micrométriques les plus exactes.

Dans les instruments qui peuvent avoir à subir des efforts violents, il est quelquefois avantageux de rendre une pièce tout à fait fixe, même au risque de lui faire éprouver une compression ou une déformation. Mais lorsqu'il s'agit d'instruments de précision, il est essentiel que le nombre et la position des points d'appui de chaque pièce soient strictement définis.

4.—Manière de placer un Instrument dans une Position déterminée.

Quant un instrument doit occuper une position déterminée sur une base fixe, il doit reposer sur six points d'appui disposés de telle sorte que, si l'un d'eux venait à être supprimé, la direction dans laquelle la partie correspondante de l'instrument pourrait se mouvoir, soit autant que possible normale au plan tangent au point d'appui.

(Cette condition implique : que de toutes les normales aux plans tangents aux divers points d'appui, il n'y en ait pas deux qui coïncident entre elles ; qu'il n'y en ait jamais trois dans un même plan, ou concourant en un même point, ou parallèles entre elles ; ni quatre dans un même plan, ou concourantes, ou parallèles, ou, plus généralement, appartenant à un même système de génératrices d'un hyperboloïde à une nappe. Les conditions relatives à cinq ou à six normales sont plus compliquées.)*

Ces conditions se trouvent réalisées par la méthode qui consiste à tracer, sur la base fixe, trois sillons en forme de V dont les

* Voir Ball, Sur la Théorie des Vis.

côtés sont inclinés de 45° sur la base, et dont les directrices se rencontrent en un même point sous des angles de 120°. L'instrument ainsi disposé a trois pieds ; l'extrémité de chacun d'eux est à peu près conique, mais arrondie au sommet de façon à ce qu'appuyant sur les deux côtés des sillons, elle n'en puisse atteindre le fond. L'instrument a ainsi six points d'appui solides ; il est maintenu en place par son propre poids sans être soumis à aucune tension inutile.

Sir William Thomson, qui a consacré beaucoup d'attention à ce sujet spécial, a adopté dans quelques instruments une disposition un peu différente. Un trou triangulaire, semblable à celui que produit l'angle d'un cube en pénétrant dans une masse d'argile, est percé dans la base, et un sillon en forme de V est creusé dans une direction passant par le centre du trou. Les pieds de l'instrument sont tous les trois arrondis, mais de longueurs différentes. Le plus long pénètre dans le trou et a trois points d'appui ; le second, placé dans le sillon, en a deux ; le troisième enfin, fixé sur le plan horizontal de la base, n'en a qu'un. Les six points d'appui se retrouvent donc bien comme dans le cas précédent. Cette méthode, si elle ne donne pas une stabilité aussi absolue que l'autre, offre l'avantage que chaque pied étant différent des autres, il est impossible d'en placer un là où il ne doit pas être sans s'apercevoir aussitôt de l'erreur commise.

5.—Points d'Appui des Miroirs.

Le nombre et la position des points d'appui des miroirs sont d'une extrême importance, car le moindre effort éprouvé par un miroir altère sa forme, ce qui le rend impropre à des observations exactes.

Pour les petits miroirs, la méthode la plus avantageuse consiste à en faire reposer une des faces sur trois points d'appui solides, le contact avec eux étant obtenu au moyen de trois ressorts placés sur les faces opposées. Ces ressorts empêcheront tout mouvement du miroir hors de son propre plan. Les brides placées sur

les bords mêmes du miroir, pour l'empêcher de se déplacer dans son propre plan, sont dans le cas qui nous occupe de moindre importance.

Il n'en est plus de même pour les appareils de dimensions considérables, par exemple pour les réflecteurs de grands télescopes ; il faut alors des points d'appui auxiliaires nombreux pour soulager le miroir de son propre poids ; mais en aucun cas ceux qui sont fixés au dos du miroir ne doivent dépasser le chiffre de trois ; autrement toute flexion du cadre altérerait la surface.

6.—Supports des Étalons de Longueur.

Il est de toute importance que les étalons qui servent à déterminer l'unité de longueur d'un pays, ne soient pas exposés à des efforts trop grands.

La boîte dans laquelle est renfermé le yard déposé à la Chancellerie de l'Échiquier est munie de points d'appui ; leur position a été calculée de manière à ce que la barre puisse reposer sur eux en supportant aussi peu d'effort que cela est possible pour un corps aussi lourd.

7.—Points d'Appui des Parties mobiles.

Les mouvements les plus importants, dans le cas d'un seul degré de liberté, sont les suivants :

1° Mouvement de rotation autour d'un axe.

2° Mouvement rectiligne.

3° Mouvement spiral résultant de la combinaison de la rotation autour d'un axe avec le déplacement le long du même axe.

Lorsqu'un instrument ne doit avoir qu'un seul degré de liberté, il faut qu'il soit muni de cinq supports, puisque la sixième condition est fournie par la pièce qui règle le mouvement de l'appareil.

Le mouvement de rotation autour d'un axe est celui qu'on parvient à obtenir avec le plus de précision.

Dans les instruments astronomiques, quatre points d'appui sont représentés par deux Y sur lesquels repose l'extrémité cylindrique

des tourillons; et le cinquième par la pression longitudinale d'un support contre une extrémité du tourillon, ou de la languette qu'il porte. En général, l'instrument est assez lourd pour se maintenir lui-même en contact avec ses points d'appui; mais, si le poids devient trop considérable et que la pression risque de causer quelque dommage, il devra être en partie soutenu par des supports auxiliaires dont la pression est régularisée par des contre-poids ou des ressorts.

8.—Mouvement Rectiligne.

Le mouvement de translation dans une direction fixe est le genre de mouvement des pièces qui, dans un appareil, glissent le long d'autres pièces fixes; par exemple les verniers et les microscopes dans les appareils de mesure (cathétomètres, micromètres), les pistons des machines à vapeur et des pompes, etc.

Lorsqu'un trépied doit subir un mouvement de cette nature sur un plan horizontal, deux de ses pieds peuvent glisser dans un sillon en forme de V, tandis que le troisième repose sur le plan.

Lorsqu'une verge cylindrique doit avoir un mouvement longitudinal, il faut qu'elle repose sur deux Y fixes et qu'elle soit dans l'impossibilité de tourner autour de son axe, ce que l'on obtient au moyen d'un appendice relié au cylindre ou aux parties fixes et glissant sur une surface dont le plan passe par l'axe du cylindre.

Lorsque, comme dans les cathétomètres, une pièce doit glisser le long d'une tige, ses cinq points d'appui doivent être arrangés de telle façon que trois d'entre eux forment un triangle sur une face de la tige; les deux autres reposent sur une face adjacente, la ligne qui les réunit étant parallèle à la direction du mouvement. Ces points d'appui peuvent être rendus parfaitement fermes au moyen de ressorts appliqués sur les autres faces de la tige.

9.—Parallélogrammes articulés.

Dans toutes les méthodes qui consistent à guider une pièce par glissement, il y a toujours une perte considérable d'énergie par

suite des frottements. Dans beaucoup de cas, cependant, cet inconvénient n'est pas à comparer avec celui qui résulte de l'imperfection même des surfaces conductrices, imperfections qu'elles doivent, soit aux défauts de construction, soit aux efforts qu'elles ont subis et à leur propre usure.

Il est vrai que l'art de façonner des surfaces vraiment planes ou cylindriques a fait de grands progrès, qui sont dus, surtout, à sir J. Whitworth; mais ces surfaces sont sujettes à se détériorer, non-seulement par l'usure, mais aussi par l'effet des tensions et des inégalités de température, en sorte qu'il n'est jamais prudent de compter sur la perfection dans l'adaptation d'une surface d'appui de grande étendue, sauf lorsqu'elle est soumise à une pression considérable.

Avec les parallélogrammes articulés, les mouvements relatifs de deux pièces quelconques, là où elles sont en contact, consistent en une simple rotation autour d'un essieu bien tourné. L'étendue des surfaces de glissement se trouve ainsi réduite à un minimum, en sorte qu'il y a moins de perte de force résultant du frottement, et les supports de cette nature peuvent approcher beaucoup plus de la perfection que ceux de toute autre espèce. Par conséquent, dans tous les moteurs ou autres machines pour lesquelles les pertes de force par frottement doivent être évitées, et même dans celles qui exigent une grande précision, il est très-désirable que les mouvements soient autant que possible dirigés par parallélogrammes articulés.

L'appareil appelé le parallélogramme de Watt, du nom de son inventeur, était un premier essai d'un mouvement de translation commandé par des pièces articulées. Mais, bien que le mouvement dirigé de cette manière soit presque parallèle, il ne l'est cependant pas exactement. Diverses autres dispositions ont été imaginées depuis l'époque de Watt; telles sont, par exemple, celles que Mr. Seaward a adoptées pour les machines du *Gorgon*. Mais tous ces systèmes nécessitaient, ou bien une déviation du mouvement rectiligne, ou un contact par glissement

sur une surface plane, et il était généralement admis par tous les mathématiciens qu'un mouvement parfaitement rectiligne dirigé par simple articulation était une impossibilité géométrique.

Ce fut dans l'année 1864 que M. Peaucellier fit connaître son invention réalisant un mouvement exactement rectiligne au moyen d'un système articulé, et ouvrit ainsi un vaste champ à la science des machines et de leurs applications pratiques. Les mouvements par articulation imaginés par M. Garcia, M. Penrose et d'autres, ainsi que les développements de la théorie de ces mouvements dus à Sylvester, Hart et Kempe, sont bien connus, et l'espace nous manquerait ici pour les décrire d'une manière complète.

10.—Mouvement spiral.

Dans les instruments, les ajustements sont en grande partie obtenus au moyen de vis. Dans le cas des vis calantes supportant le poids d'un instrument, le pas de la vis est toujours en contact avec son point d'appui naturel dans l'écrou. Mais dans les vis micrométriques il est nécessaire d'assurer ce contact au moyen d'un ressort. Ce dernier porte, en général, sur l'extrémité même de la vis ou sur une languette qui la termine. Mais cette disposition a l'inconvénient de produire une pression variable à mesure que la vis se meut. Un arrangement bien préférable consiste à faire porter le ressort, non plus sur la vis même, mais sur un écrou mobile qui peut se mouvoir sur cette vis et qu'un arrêt convenablement placé empêche de tourner autour d'elle. Cet écrou mobile se trouvant toujours à la même distance de l'écrou fixe, la pression du ressort demeure constante. Telle est la disposition des vis micrométriques des électromètres de sir W. Thomson.

11.—Sur les Dispositions assurant la Liberté du Mouvement.

Dans beaucoup d'instruments il existe une pièce mobile servant d'indicateur et dont la position ou le déplacement doivent

être observés pour obtenir la mesure de la force qui agit sur lui. Cette force peut être le poids d'un corps, ou bien une attraction, ou une répulsion de nature quelconque ; mais la résistance due au frottement intervient toujours alors comme force perturbatrice.

Si l'énergie et la direction de ce frottement étaient connus exactement à chaque instant, cette influence perturbatrice n'aurait pas grand inconvénient ; mais comme la quantité de frottement est sujette à des variations subites dont il n'est souvent pas possible de découvrir les causes, le seul moyen d'atteindre un certain degré de précision consiste à diminuer autant que possible les effets des frottements. Les moyens que l'on emploie pour cela sont de deux sortes. Tout contact de glissement est accompagné de frottement et, d'autre part, il ne saurait y avoir de mouvement tout à fait libre sans contact de glissement ; mais en rendant l'étendue du mouvement de glissement petite en comparaison du déplacement de l'indicateur, on arrive à réduire l'effet du frottement à n'être plus qu'une très-petite partie de l'effet total. Dans les pièces tournantes ce résultat s'obtient en diminuant les dimensions de l'essieu, et dans les roues dentées en ayant soin que les points de contact des dents soient aussi rapprochés que possible de la ligne des centres, ou, mieux encore, en faisant usage des dents tronquées obliquement telles que celles de Hook.* De même une aiguille de boussole est équilibrée sur une pointe très-fine et la surface du support est ainsi rendue si petite que la moindre force appliquée à l'une des extrémités de l'aiguille est suffisante pour la faire tourner.

Dans tous les cas de ce genre l'effet du frottement est atténué par la diminution du mouvement de glissement.

Dans les balances et autres leviers, le support a la forme d'un prisme appelé couteau, dont l'angle mesure à peu près 120° ; l'arête de ce prisme est rendue parfaitement rectiligne et repose sur une surface d'agate plane et horizontale.

* Communiqué à la Société Royale en 1866. Voir Willis's Principles of Mechanism, 1870, p. 53.

Le mouvement relatif, dans ce cas, est un contact de roulement.

Dans une autre catégorie d'instruments, les glissements et les roulements sont entièrement éliminés et la liberté de mouvement voulue résulte de la flexibilité de certaines pièces solides.

C'est ainsi que beaucoup de pendules, au lieu de reposer sur des couteaux, sont suspendus au moyen de ressorts de montre, et les balances de torsion sont suspendues au moyen de fils métalliques ou de fils de soie. Le mouvement de la pièce est alors, il est vrai, affecté par l'élasticité du système de suspension, mais cette force est beaucoup plus régulière dans son mode d'action que ne l'est le frottement. On peut tenir un compte exact des effets dus à cette élasticité et faire subir une correction précise aux résultats observés.

12.—Verge de Torsion ou Balance de Torsion.

La balance de torsion a rendu les plus grands services à la science moderne pour la mesure des petites forces. Le premier instrument de ce genre a été celui construit par le Rév. John Michell, autrefois professeur Woodwardien de Géologie à Cambridge, qui s'en servit pour étudier l'effet de l'attraction de deux boules de plomb de grandes dimensions sur deux autres boules plus petites, suspendues aux extrémités du levier de la balance. Michell, cependant, mourut avant d'avoir eu l'occasion de faire cette expérience, et son appareil passa au professeur F. J. H. Wollaston, qui le transmit à Henry Cavendish. Ce dernier, qui le perfectionna beaucoup, parvint à mesurer l'attraction des boules en question et à déterminer ainsi la densité de la terre.

L'expérience a depuis été répétée par Reich et par Baily. Enfin, il ne faut pas oublier qu'indépendamment de Michel, et avant même que Cavendish se fût servi de son instrument, Coulomb avait déjà inventé une balance de torsion pour établir les lois de l'attraction et de la répulsion des corps électriques et magnétiques.

13.—Suspension bifilaire.

L'élasticité de torsion d'un fil métallique, bien qu'elle soit beaucoup plus régulière que le frottement, est cependant aussi sujette à des variations, provenant de causes encore inconnues, qui dépendent probablement des circonstances par lesquelles le fil peut avoir passé antérieurement, telles que les torsions ou autres efforts qu'il a pu subir avant d'être suspendu. C'est pourquoi il est souvent préférable d'employer un autre mode de suspension dans lequel la force de restitution dépend principalement du poids des pièces suspendues.

Dans ce but, le corps est suspendu par deux fils métalliques, ou deux fibres de soie très-rapprochées l'une de l'autre, et presque verticales, réunies par une poulie de telle sorte que leurs tensions soient égales. Le corps suspendu est alors en équilibre tant que les deux fibres se trouvent dans un même plan. Dès qu'on fait tourner ce corps autour d'un axe vertical, la tension des fibres produit une force qui tend à le ramener vers sa position d'équilibre. Cette force est très-régulière dans son mode d'action et peut être déterminée exactement par l'expérience.

Cette disposition, qui a reçu le nom de suspension bifilaire, a été imaginée par Gauss et Weber, qui l'ont appliquée à leur appareil magnétique. Baily s'en est servi plus tard dans ses recherches sur l'attraction des boules.

14.—Méthode de Lecture.

On appelle *lecture* la détermination de la position de la pièce indicatrice d'un instrument. On a fait usage de diverses méthodes pour ces déterminations. Celle qui est le plus employée, consiste à façonner cette pièce en une aiguille légère, dont la pointe se meut près d'un cercle gradué. La position de l'aiguille se détermine en observant la position de sa pointe par rapport aux divisions de l'échelle. En se servant d'une aiguille munie de deux pointes répondant aux deux extrémités d'un même diamètre,

on parvient à éliminer les erreurs provenant du défaut de coïncidence entre le centre du cercle gradué et l'axe de mouvement de l'aiguille.

Telle est la méthode adoptée pour les boussoles magnétiques. Comme il est nécessaire, pour assurer la liberté du mouvement, que la pointe de l'aiguille n'entre pas en contact immédiat avec le limbe gradué, la lecture se trouve dépendre des variations de position de l'œil de l'observateur. L'erreur qui en résulte se nomme erreur de parallaxe. C'est pourquoi, dans certains instruments, la lecture se fait au travers d'un trou oculaire dans une position déterminée. Il est préférable, cependant, de placer un miroir plan sous l'aiguille, et de faire la lecture en plaçant l'œil de telle sorte que l'aiguille semble recouvrir sa propre image sur le miroir.

15.—Spiegel-Ablesung, soit Lecture par Miroir.

Une méthode encore plus exacte est celle inventée par Poggendorff et adoptée par Gauss et Weber pour leurs observations magnétiques. Un petit miroir plan est fixé sur la pièce indicatrice de telle manière qu'il tourne avec elle autour d'un même axe que l'on peut supposer vertical. Perpendiculairement à l'axe, on dispose une échelle graduée dont la normale médiane passe par cet axe. L'image de cette échelle réfléchie sur le miroir s'observe au moyen d'un télescope renfermant un fil vertical dans le plan de la vision distincte. Lorsque la pièce indicatrice tourne autour de son axe, l'image de l'échelle passe à travers le champ du télescope et on peut observer la coïncidence de l'image de l'une quelconque des divisions de l'échelle avec le fil vertical.

L'erreur de parallaxe se trouve entièrement éliminée par cette méthode, puisque les deux images optiques dont la position relative doit être observée se trouvent toutes deux dans un même plan.

Une autre méthode, reposant aussi sur l'emploi du miroir, consiste à renverser la direction des rayons lumineux en supprimant l'oculaire du télescope et en le remplaçant par la flamme d'une

lampe. La lumière émergeant de l'objectif tombe sur le miroir, où elle se réfléchit de manière à former sur l'échelle une image quelque peu confuse de la flamme, traversée par une image nette du fil vertical. La lecture consiste alors à observer la position de ce fil vertical sur l'échelle graduée.

Dans beaucoup d'instruments, tels que le galvanomètre à réflexion de Thomson, on se passe du télescope et on emploie un miroir concave.

16.—Spectre de Ramsden.

Dans le but de déterminer la position exacte d'un fil à plomb sans avoir à le toucher, Ramsden a imaginé de munir cet instrument d'une lentille, et de disposer auprès de lui un fil vertical de telle manière, que l'image du fil à plomb formée par la lentille coïncide exactement avec le fil vertical, lorsque l'instrument est dans sa position normale. En déplaçant l'instrument jusqu'à ce que la coïncidence ait lieu, celui-ci se trouve amené dans sa position naturelle. Cette disposition est connue depuis longtemps sous le nom de Spectre de Ramsden. En fait elle n'est qu'une forme simplifiée du microscope à lectures, et il n'y a pas de meilleure méthode pour s'assurer qu'un corps délicatement suspendu se trouve exactement dans sa position normale.

17.—Télescope collimateur.

Lorsque deux télescopes sont placés l'un en face de l'autre et que les fils croisés du premier, vus au travers du second, paraissent coïncider avec ceux du second, c'est que les axes optiques des deux instruments sont parallèles. Cette manière de constater le parallélisme est employée en astronomie, et on la nomme la méthode des télescopes collimateurs, ou des collimateurs.

Elle est aussi appliquée dans les magnétomètres transportables de Kew. Dans ceux-ci l'aimant est creux. L'une de ses extrémités porte une lentille et l'autre est munie d'une échelle située au foyer d'une seconde lentille. L'aimant est ainsi, par lui-même,

un télescope collimateur que l'on observe au moyen d'un autre télescope monté sur un cercle gradué. L'inconvénient de cette méthode consiste en ce que l'échelle sort rapidement du champ de vision dès que l'aimant est le moins du monde dévié, ce qui oblige l'observateur à déplacer son télescope s'il veut obtenir une nouvelle lecture.

18.—Trois Sortes de Lectures.

En fait nous pouvons grouper nos instruments en trois classes, suivant les méthodes de lecture auxquelles ils se prêtent.

Dans la classe des instruments enregistreurs l'observateur abandonne l'appareil à lui-même et examine le registre lorsque cela lui convient.

Dans ceux qui dépendent entièrement des observations visuelles, l'observateur doit être présent pour regarder l'indicateur, mais il ne touche pas l'instrument.

Dans la troisième classe, qui dépend à la fois de l'œil et de la main, l'observateur doit effectuer certains ajustements de l'instrument avant de faire la lecture.

19.—Fonctions des Instruments.

Les remarques précédentes s'appliquent aux parties constituant les appareils, indépendamment des branches spéciales de la science auxquelles ils servent.

La classification des instruments spéciaux se comprendra mieux, si nous arrangeons ceux qui servent dans chaque branche de la science d'après leurs fonctions respectives ; quelques-unes de ces fonctions ayant des instruments qui leur correspondent dans plusieurs sciences différentes, tandis que d'autres sont spéciaux à une seule science.

Toutes les sciences physiques se rapportent à la transmission, d'un corps à un autre, de l'énergie sous ses diverses formes. Mais l'optique et l'acoustique se rapportent souvent aussi aux sensations de la vue et de l'ouïe. En réalité ces deux sciences ont

à la fois un caractère physiologique et un caractère physique, en sorte que certaines de leurs parties ont moins d'analogie avec les sciences purement dynamiques.

Les fonctions les plus importantes appartenant aux instruments ou à leurs pièces diverses sont les suivantes :

1° La source de l'énergie. L'énergie, qui entre en jeu dans le phénomène que nous observons, n'est naturellement pas *produite de rien*, mais elle entre dans l'appareil en un certain point déterminé que nous appelons la source.

2° Les conduits ou distributeurs de l'énergie, qui la conduisent là où elle est nécessaire à la production du travail.

3° Les freins qui l'empêchent de travailler lorsqu'on n'en a pas besoin.

4° Les réservoirs dans lesquels l'énergie est emmagasinée jusqu'au moment où elle est requise.

5° Les appareils permettant la sortie de l'énergie superflue.

6° Les régulateurs destinés à égaliser la marche du travail.

7° Les indicateurs ou pièces mobiles sur lesquelles agissent les forces que l'on étudie.

8° Les échelles fixes sur lesquelles se lit la position de l'indicateur.

Ainsi dans les machines solides nous avons :

1° Les moteurs.

2° Les mécanismes.

3° Les cadres fixes.

4° Les volants, ressorts, poids soulevés.

5° Les freins à frottement.

6° Les régulateurs, pendules, ressorts, balanciers dans les montres.

7° Les dynamomètres, strophomètres, indicateurs de Watt, chronographes, etc.

8° Échelles pour les indicateurs. Étalons de longueur et de masse. Étalon astronomique de temps.

Pour les machines dépendant de la pression des fluides nous avons :

1° Les pompes, pistons pour condenser ou raréfier, Piézomètre d'Oersted, appareil d'Andrews pour les hautes pressions.
2° Tuyaux et tubes.
3° Les tampons, laveurs, tubes de caoutchouc, articulations à paraffine, fusion et autres méthodes pour rendre les jointures hermétiques.
4° Chambres à air, réservoirs d'eau, chambres vides.
5° Soupapes de sûreté.
6° Régulateurs de Siemens et autres, régulateur de Cavaillé-Col pour les soufflets d'orgues.
7° Jauges de pression, baromètres, manomètres, sphygmographes, etc. ; aréomètres, flacons de pesanteur spécifique, appareils pour mesurer les courants, compteurs à gaz.
8° Échelles de ces jauges.

Pour les phénomènes thermiques :

1° Les fourneaux, flammes de chalumeau, mélanges réfrigérants, chaleur solaire et électrique.
2° Tuyaux à eau chaude, conduits en cuivre.
3° Enveloppes non-conductrices, ciments, revêtements, etc. ; manchons à vapeur et à glace.
4° Régénérateurs, surface de chauffe, etc.
5° Condenseurs et soupapes de sureté.
6° Thermostats, (1) par régulateurs à gaz, (2) par ébullition d'un liquide de composition connue.
7° Thermomètres, pyromètres, pile thermo-électrique, thermomètre à résistance de Siemens, calorimètres.

8° Points fixes de températures : glace fondante, eau bouillante, etc.

Pour les phénomènes électriques :

1° Les machines électriques, machines à frottement, électrophore, machine de Holtz ; batteries voltaïques, batteries thermo-électriques, machines magnéto-électriques.
2° Fils et autres conducteurs métalliques ; armature des aimants.
3° Isolateurs.
4° Bouteilles de Leyde et autres condenseurs ; batteries secondaires ou éléments à polarisation ; aimants et électro-aimants.
5° Rhéostats, paratonnerres.
6° Voltastat de Guthrie, régulateurs de lampes électriques, etc.
7° Électroscopes et électromètres. Balance de torsion de Coulomb, voltamètres, galvanomètres et électro-dynamomètres, magnétomètres.
8° Étalon de résistance, de capacité, de forces électro-motrice, etc., tels que le Ohm, le microfarad, l'élément voltaïque constant de Clark.

Au point de vue physique, par opposition au point de vue physiologique, l'Acoustique se rapporte à la production des vibrations et à la propagation des ondes dans les solides, les liquides et les gaz, tandis que l'Optique traite de la production des vibrations et de la propagation de la radiation dans le milieu luminifère.

Au point de vue physiologique, on ne considère dans la matière ordinaire que les seules ondes qui peuvent exciter en nous la sensation du Son, bien que l'on puisse aussi, par des méthodes convenables, découvrir et étudier celles de ces ondes que nous ne percevons pas de cette manière.

Dans l'optique physiologique on ne s'occupe que des radiations capables de produire en nous la sensation de la lumière, bien que

d'autres radiations puissent aussi être reconnues et étudiées par leurs effets thermiques, chimiques et même mécaniques.

VIBRATIONS ET ONDES.

POINT DE VUE PHYSIQUE DE L'ACOUSTIQUE.

1° Sources. Vibrations des divers corps.

Air—Tuyaux d'orgue, résonateurs et autres instruments à vent.

Instruments à anches.

Sirène.

Cordes . . .	Harpe, etc.
Membranes . .	Tambour, etc.
Plaques . . .	Gong, etc.
Verges . . .	Diapasons, etc.
2° Distributeurs. Air . .	Tubes parlants, stéthoscopes, etc.
Bois . .	Verges sonores.
Métal . .	Fils.

3° Revêtement des planchers, etc.

4° Réservoirs, résonateurs, tuyaux d'orgue, tables sonores.

5° Étouffoirs des pianos.

6° Régulateurs, soufflets d'orgues.

7° Analyseurs, l'oreille, les flammes sensibles, membranes, phonautographes, etc.

8° Les diapasons, tuyaux donnant le ton, échelles musicales.

OUÏE.

POINT DE VUE PHYSIOLOGIQUE DE L'ACOUSTIQUE.

Appareils servant à déterminer les conditions :

1° De la perceptibilité des sons.

2° De la perception des différences entre les sons.

3° De l'accord ou du désaccord de sons simultanés.

4° De la succession mélodique des sons.

5° Du timbre des sons et de la distinction des sons voyelles.

6° Du temps requis pour la perception de la sensation du son.

RADIATION.

POINT DE VUE PHYSIQUE DE L'OPTIQUE.

1° Sources de radiation. Corps chauds solides, liquides et gazeux.

Solides.—Chauffés au moyen d'un chalumeau, comme dans la lumière oxyhydrique à la chaux.

Chauffés par leur propre combustion, comme dans la lumière du magnésium et les charbons ardents.

Chauffés par un courant électrique, comme les électrodes à charbon de la lampe électrique.

Chauffés par la radiation concentrée d'autres sources, comme dans le phénomène appelé Calescence.

Liquides, comme dans les métaux en fusion et autres corps.

Gazeux.—Chauffés par leur propre combustion, comme dans les flammes.

Chauffés à la lampe de Bunsen, comme la lumière de sodium.

Chauffés par l'arc voltaïque.

Chauffés par l'étincelle d'induction.

2° Distributeurs. Miroirs ardents et lentilles, lentilles condensantes du microscope solaire, lanternes magiques, etc.; appareils des phares; télescopes, microscopes, etc.

3° Analyseurs. Milieux absorbants et corps colorés en général, etc., tourmalines, prismes de Nicol et autres polariseurs.

4° Corps phosphorescents, fluorescents et calescents.

5° Écrans opaques, diaphragmes et fentes.

6° Régulateurs. L'iris de l'œil.

7° Photomètres, appareils photographiques, actinomètres, thermopile, photomètre de Bunsen et de Roscoe, photomètre à selenium, radiomètre de Crookes et autres instruments.

8° Raies de Fraunhofer, comme terme de comparaison et cartes spectrales. Bougie type, brûlant 120 grains de spermaceti par heure.

Vue.

Point de vue physiologique de l'Optique.

Appareils pour déterminer les conditions de :

1° La visibilité des objets sous le rapport de leurs dimensions, éclairement, etc.

2° La perception et la distinction des objets.

3° La perception de la couleur en rapport avec la composition de la lumière émanant de l'objet.

Appareils pour comparer l'intensité des impressions lumineuses, en tant qu'elles dépendent de l'intensité de la cause qui les produit et de la durée pendant laquelle cette cause a agi, ainsi que pour représenter les phases et le développement de l'impression lumineuse depuis son début jusqu'à sa cessation.

Ophthalmomètres, pour mesurer les dimensions de l'œil et déterminer ses mouvements, ainsi que les deux limites de la vision distincte.

Ophthalmoscopes, pour éclairer et observer l'intérieur de l'œil.

Appareils biologiques.

1° Pour mesurer les aliments ingérés, les excrétions et le poids des êtres vivants.

2° Pour éprouver la force des animaux et mesurer le travail qu'ils fournissent.



3° Pour mesurer la chaleur qu'ils produisent.

4° Pour déterminer les conditions de fatigue des muscles.

5° Pour analyser les phénomènes de la propagation des impulsions dans les nerfs et l'excitation de l'action musculaire.

6° Pour tracer et enregistrer l'action rhythmique des phénomènes circulatoires et respiratoires, cardiographes, sphygmographes, stéthoscopes, etc.

7° Appareil de Marey pour enregistrer les pas des hommes, chevaux, etc., ainsi que les mouvements des oiseaux et des insectes pendant leur vol.

8° Instruments pour éclairer et rendre visible l'intérieur du corps vivant--ophthalmoscopes, laryngoscopes, etc., et appareils pour transmettre la lumière au travers de certaines parties du corps vivant.

9° Instruments pour faire varier l'état électrique des corps—hélices d'induction, etc.

10° Instruments pour déterminer l'état électrique des organes vivants—galvanomètres avec électrodes appropriés, électromètres, etc.

J. CLERK-MAXWELL.

INSTRUMENTS ARITHMÉTIQUES.

ENTRE toutes les branches des connaissances humaines comprises sous le nom de science, l'arithmétique est celle qui a le caractère le plus abstrait, et qui en même temps est de l'application la plus universelle dans l'étude des phénomènes naturels. L'art de compter, ou de la numération, est l'un des premiers, s'il n'est le premier produit de la civilisation naissante, et chez les races sauvages du genre humain, les progrès plus ou moins grands qui ont été accomplis quant à l'acquisition de cet art, donnent une mesure assez juste du degré de culture et de développement intellectuel qui a été atteint. On dit qu'il existe des races dont l'échelle de numération est limitée à deux ou trois nombres; d'autres peuvent aller à cinq, dix ou vingt; et nous pouvons être certains qu'aucune tribu d'hommes, n'ayant pas reçu les enseignements d'une race supérieure, ne peut acquérir l'art de compter par centaines et par milliers, si elle ne possède une moyenne élevée de capacités intellectuelles, et si elle n'a point part au privilége accordé seulement à certaines nations, de produire parfois des hommes doués d'un génie inventif, et de vrais maîtres de la pensée.

Les branches les plus favorisées des familles sémitiques et aryennes (les Juifs, les Égyptiens, les Grecs et les nations de l'Inde parlant le sanscrit), doivent avoir atteint, déjà dans une période très-ancienne, cet état comparativement avancé de culture intellectuelle. Mais il faut remarquer que l'étendue réelle du domaine de l'arithmétique (domaine dans un certain sens marchant

de pair avec celui de la science exacte), ne fut reconnue qu'à une époque très-postérieure.

Les philosophes grecs, au moins vers le temps d'Aristote, avaient appris à faire une distinction entre les quantités *discrètes* ou *discontinues* et les quantités *continues*. Tout compte proprement dit se rapporte à des quantités discontinues, toute mensuration à des quantités continues. Donnons-en un simple exemple : lorsque nous comptons des marques ou des points sur une ligne, nous disons : "Deux points plus un point font trois points;" lorsque nous mesurons en pouces, nous pouvons dire également : "Deux pouces plus un pouce font trois pouces." Mais dans le dernier cas on peut, si l'on veut, passer par des degrés intermédiaires et insensibles, de deux pouces à trois pouces ; tandis que dans le premier cas, on passe brusquement de deux à trois points ; il n'existe pas de demi-point, et on ne peut concevoir aucun degré intermédiaire.

Quoique cette importante distinction fût clairement comprise à une époque très-ancienne, parce qu'elle était de nature à s'imposer spécialement à l'esprit philosophique de l'antiquité classique, on n'avait cependant pas au même degré une conception distincte de cette vérité, que les quantités continues, aussi bien que les quantités discontinues, appartiennent toutes deux au domaine de l'arithmétique. Nous ne pouvons dire d'une manière précise qui en eut le premier un sentiment confus, ou qui le premier atteignit à la réalité éclatante de ce principe. Cette idée doit probablement s'être graduellement insinuée dans l'esprit des hommes en même temps que la science se développait. Peut-être à la rigueur la distingue-t-on dans les écrits de Platon et d'Aristote ; elle est implicitement admise, tout en étant soigneusement passée sous silence, dans le cinquième livre des Éléments d'Euclide. Ce principe doit avoir été présent à l'esprit d'Archimède, lorsqu'il mesurait les proportions relatives de la sphère, du cylindre et du cône ; il doit s'être imposé dans les observations des astronomes grecs, qui travaillaient à relever numériquement à des intervalles

discontinus les phases de phénomènes continus. Il ne fut solidement établi comme un axiome, que par le développement de ce mode de calcul arithmétique qu'on appelle l'algèbre, par la grande invention de Descartes, qui ramena la géométrie à l'algèbre, et enfin par la création des méthodes arithmétiques connues sous le nom de calcul infinitésimal.

Bien que la conception de la continuité absolue de la grandeur arithmétique soit d'un caractère très-abstrait, elle a exercé cependant une influence prépondérante sur l'esprit scientifique. Que, d'un côté, tous les phénomènes naturels suivent une marche continue, et qu'ils soient tous mensurables quantitativement; que d'un autre côté, la loi d'un phénomène continu quelconque puisse être exprimée par une formule arithmétique; ce sont là des propositions admises par tous ceux qui les comprennent, et auxquelles, dans le fait, on ajoute dans certains cas une foi beaucoup moins limitée que ne le comporte, quelque haut qu'il soit, le degré d'évidence qu'il est possible de leur donner. Ce n'est pas tout: car s'il y a une seule opinion concernant la nature qui soit maintenant universellement acceptée par les savants, c'est que les plus petits aussi bien que les plus grands phénomènes sont soumis à "l'empire de la loi." Si l'on demande quelles sont les raisons capitales qui peuvent justifier cette croyance, nous pouvons les résumer en répondant que, autant que nos appréciations sont exactes, et aussi loin que notre arithmétique est capable de rivaliser avec celle de la nature, nous avons uniformément trouvé que nos observations sur les phénomènes continus concordent strictement avec les déductions tirées de la science abstraite des nombres continus.

Nous allons maintenant présenter quelques observations sur les deux branches de l'arithmétique, celle des quantités discontinues et celle des quantités continues. Le cours de ces remarques montrera clairement pourquoi une science d'une importance incalculable pour les autres sciences, ne fait néanmoins pas un étalage bien considérable de ses prétentions dans une Exposition d'appareils scientifiques.

(1.) Les simples opérations de compter, d'enregistrer les nombres comptés, et de les comparer avec un autre nombre, opérations qui constituent le principal travail de l'arithmétique pratique, ont été tellement facilitées par les deux grandes inventions du système décimal et des logarithmes, que, dans beaucoup de cas, il n'y a guère eu de motifs de remplacer le travail que nécessitent ces calculs par des appareils mécaniques.

Cependant les machines à compter ont été trouvées indispensablement nécessaires pour certaines fins. Sir John Herschel a défini une horloge comme une machine à compter et enregistrer le nombre des oscillations d'un pendule; toutefois nous sommes obligés d'ajouter à cette définition, que toute horloge doit aussi contenir un mécanisme destiné à maintenir l'état d'oscillation du pendule malgré le frottement et la résistance de l'air. Un podomètre est un instrument pour compter et enregistrer le nombre de pas que fait la personne qui le porte. Les distances le long d'une route sont mesurées approximativement en faisant rouler sur le chemin une roue à laquelle est adapté un appareil qui compte et enregistre les révolutions. De la même manière on peut disposer un tourniquet pour compter le nombre de ses propres révolutions, c'est-à-dire le nombre de personnes qui passent à une porte.

Ce ne sont là que de simples exemples de machines employées pour les usages communs de la vie : mais on peut considérer la construction de machines à calculer, adaptées à des fins plus variées et plus compliquées que celle de compter simplement, comme l'un des points les plus difficiles qui aient exercé le génie des mathématiciens et des mécaniciens. La première idée d'une machine de cette espèce paraît être due au célèbre Blaise Pascal; l'appareil qu'il construisit était combiné pour additionner et soustraire des sommes d'argent. Deux machines à calculer, construites en 1775 et en 1777, par James Bullock pour le vicomte Mahon, se trouvent à l'Exposition. Mais l'idée d'une machine *par différence*, pouvant servir à calculer les tables des fonctions analytiques, a été pour la première fois réalisée avec succès par

Charles Babbage ; en effet les inventions analogues qui avaient été proposées antérieurement n'étaient destinées qu'à exécuter les simples opérations arithmétiques, addition, soustraction, multiplication et division. Les dernières années de la vie de Babbage furent consacrées à la construction, ou plutôt au plan d'une grande machine analytique, qui devait avoir une puissance de calcul dépassant beaucoup celle de la machine par différence, et comprendre dans le fait tout le champ de l'analyse arithmétique.

Un article sur la machine de Babbage inséré dans l'*Edinburgh Review* de 1834, suggéra à George Scheutz, de Stockholm, l'idée de construire une machine pour calculer et imprimer simultanément des tables arithmétiques. Après beaucoup de sujets de découragement qui furent surmontés par la persévérance de George Scheutz et de son fils Édouard, cette machine fut enfin achevée en octobre 1853. Les spécimens de tables calculées, moulées et imprimées mécaniquement,* publiés par eux à Londres en 1857, donnent la preuve convaincante de la perfection et de l'utilité de leur invention. Son originalité fut reconnue de bonne grâce par Babbage ; et dans le fait il n'y a que deux choses communes aux machines de Babbage et de Scheutz : le principe de calculer par différence, et la combinaison par laquelle les résultats computés sont transmis à l'appareil imprimeur.

Diverses machines arithmétiques sur une échelle plus petite et de construction plus simple, ont été exécutées dans ces dernières années. Quelques-unes d'entre elles servent actuellement dans les établissements publics d'Angleterre. Nous devons spécialement mentionner la machine à calculer de M. Thomas, de Colmar, et le panomètre de Édouard Grohmann, de Vienne.

Dans le monde ancien, et avant l'invention du système décimal, les opérations ordinaires de l'arithmétique étaient effectuées avec l'aide d'une " table à calculer," ou *abacus ;* les unités étant représentées par des jetons, ou cailloux (*calculi*, d'où vient le mot

* " Specimens of Tables calculated, stereo-moulded, and printed by Machinery."

calcul). Les savants ne sont pas entièrement d'accord quant à l'arrangement précis de l'ancien abaque, qui probablement n'a pas toujours été le même dans tous les cas. Il semble cependant certain que le principe d'arrangement décimal était adopté dans une certaine étendue ; des jetons dans un compartiment équivalaient à des unités, dans le compartiment voisin, ils valaient des dizaines, et ainsi de suite. Il peut paraître étrange que cette introduction partielle d'un système décimal n'eût pas conduit plus tôt à l'invention d'une notation décimale semblable à celle que nous employons maintenant. La transition aurait probablement été instantanée, si l'idée d'employer un symbole distinct pour *zéro* s'était présentée à ceux qui se servaient de l'abaque. Mais c'est précisément l'introduction de ce symbole qui forme le nœud de tout le système décimal, et on peut admettre que dans l'abaque lui-même il n'y avait rien qui pût suggérer son introduction. Les objets qui dans notre siècle ressemblent le plus à l'abaque sont les bouliers, les tables de multiplication et d'autres appareils analogues employés dans l'éducation élémentaire,* ainsi que les tableaux qui servent à marquer les points dans certains jeux.

Les transactions monétaires des anciens temps étaient parfois d'une importance approchant de celles de notre époque. Lorsque Vespasien devint empereur, il trouva, qu'après les dépenses effrénées de Néron et les guerres civiles qui suivirent, les dettes et les besoins pressants du trésor impérial et public ne s'élevaient pas à moins de trois cent trente millions sterling environ. Quelque grossièrement que les comptes de ces engagements pussent être tenus, ils n'en ont pas moins nécessité une énorme quantité de calculs, et tous ces calculs doivent avoir été simplifiés par l'abaque, car ils auraient été presque impossibles avec les caractères écrits du système romain de numération. Aucun exemple peut-être ne servirait mieux à démontrer l'im-

* Une série de ces appareils a été envoyée à l'Exposition par le comité du Musée pédagogique russe.

mense économie de travail humain qui a été effectuée par l'usage du système décimal.

L'arithmétique des nombres entiers, dont nous parlons ici, a sa partie théorique aussi bien que sa partie pratique. Cette partie théorique, appelée la Théorie des Nombres, est peut-être la seule branche des mathématiques proprement dites contre laquelle l'accusation d'inutilité ait été sérieusement portée. Néanmoins, à toutes les périodes de l'histoire de la science mathématique, elle a excité un vif intérêt, et nous lui devons, plus qu'à bien des recherches d'une utilité plus évidente, le développement de la partie pratique de l'arithmétique. Déjà vers le second ou le troisième siècle avant Jésus-Christ, les ritualistes Indous avaient été conduits au problème de : "Trouver deux nombres carrés dont la somme soit aussi un carré," par l'existence d'une croyance religieuse qui exigeait que les autels de diverses formes eussent la même étendue superficielle.

Ces recherches et d'autres semblables les mirent en présence de beaucoup de questions de mensuration, et leur apprirent à les résoudre par des méthodes approximatives avec une grande exactitude ; par exemple, le résultat qu'ils avaient trouvé pour le côté d'un carré égal à un cercle d'un diamètre donné est correct jusqu'à la troisième décimale inclusivement. Il existe encore des écrits sur ces recherches datant de cette époque, et quoiqu'ils nous parlent d'un temps où la science était encore dans l'enfance, ils fournissent un témoignage éclatant du génie et du zèle soutenu de ces anciens travailleurs. Elles sont en outre caractérisées par la prédominance de l'esprit arithmétique sur l'esprit géométrique, qui forme un contraste si marqué entre les tendances mathématiques de l'Inde et de la Grèce. Mais tandis que dans ces premiers traités nous pouvons suivre les progrès des notions mathématiques, qu'entraînèrent les exigences pratiques du vieux cérémonial védique, l'étude purement scientifique de la géométrie et de l'arithmétique dans l'Inde n'appartient qu'à une période postérieure, probablement au 4[e] siècle de notre ère. Néanmoins, les Indous

calcul). Les savants ne sont pas entièrement d'accord quant à l'arrangement précis de l'ancien abaque, qui probablement n'a pas toujours été le même dans tous les cas. Il semble cependant certain que le principe d'arrangement décimal était adopté dans une certaine étendue ; des jetons dans un compartiment équivalaient à des unités, dans le compartiment voisin, ils valaient des dizaines, et ainsi de suite. Il peut paraître étrange que cette introduction partielle d'un système décimal n'eût pas conduit plus tôt à l'invention d'une notation décimale semblable à celle que nous employons maintenant. La transition aurait probablement été instantanée, si l'idée d'employer un symbole distinct pour *zéro* s'était présentée à ceux qui se servaient de l'abaque. Mais c'est précisément l'introduction de ce symbole qui forme le nœud de tout le système décimal, et on peut admettre que dans l'abaque lui-même il n'y avait rien qui pût suggérer son introduction. Les objets qui dans notre siècle ressemblent le plus à l'abaque sont les bouliers, les tables de multiplication et d'autres appareils analogues employés dans l'éducation élémentaire,* ainsi que les tableaux qui servent à marquer les points dans certains jeux.

Les transactions monétaires des anciens temps étaient parfois d'une importance approchant de celles de notre époque. Lorsque Vespasien devint empereur, il trouva, qu'après les dépenses effrénées de Néron et les guerres civiles qui suivirent, les dettes et les besoins pressants du trésor impérial et public ne s'élevaient pas à moins de trois cent trente millions sterling environ. Quelque grossièrement que les comptes de ces engagements pussent être tenus, ils n'en ont pas moins nécessité une énorme quantité de calculs, et tous ces calculs doivent avoir été simplifiés par l'abaque, car ils auraient été presque impossibles avec les caractères écrits du système romain de numération. Aucun exemple peut-être ne servirait mieux à démontrer l'im-

* **Une série de ces appareils a été envoyée à l'Exposition par le comité du Musée pédagogique russe.**

mense économie de travail humain qui a été effectuée par l'usage du système décimal.

L'arithmétique des nombres entiers, dont nous parlons ici, a sa partie théorique aussi bien que sa partie pratique. Cette partie théorique, appelée la Théorie des Nombres, est peut-être la seule branche des mathématiques proprement dites contre laquelle l'accusation d'inutilité ait été sérieusement portée. Néanmoins, à toutes les périodes de l'histoire de la science mathématique, elle a excité un vif intérêt, et nous lui devons, plus qu'à bien des recherches d'une utilité plus évidente, le développement de la partie pratique de l'arithmétique. Déjà vers le second ou le troisième siècle avant Jésus-Christ, les ritualistes Indous avaient été conduits au problème de : "Trouver deux nombres carrés dont la somme soit aussi un carré," par l'existence d'une croyance religieuse qui exigeait que les autels de diverses formes eussent la même étendue superficielle.

Ces recherches et d'autres semblables les mirent en présence de beaucoup de questions de mensuration, et leur apprirent à les résoudre par des méthodes approximatives avec une grande exactitude ; par exemple, le résultat qu'ils avaient trouvé pour le côté d'un carré égal à un cercle d'un diamètre donné est correct jusqu'à la troisième décimale inclusivement. Il existe encore des écrits sur ces recherches datant de cette époque, et quoiqu'ils nous parlent d'un temps où la science était encore dans l'enfance, ils fournissent un témoignage éclatant du génie et du zèle soutenu de ces anciens travailleurs. Elles sont en outre caractérisées par la prédominance de l'esprit arithmétique sur l'esprit géométrique, qui forme un contraste si marqué entre les tendances mathématiques de l'Inde et de la Grèce. Mais tandis que dans ces premiers traités nous pouvons suivre les progrès des notions mathématiques, qu'entraînèrent les exigences pratiques du vieux cérémonial védique, l'étude purement scientifique de la géométrie et de l'arithmétique dans l'Inde n'appartient qu'à une période postérieure, probablement au 4e siècle de notre ère. Néanmoins, les Indous

furent les premiers à découvrir le moyen de résoudre les équations indéterminées du premier degré, méthode qui ne fut pas connue en Europe avant le 17e siècle et peut-être pas démontrée avant le 18e. Mais le couronnement de la perfection du génie mathématique indou fut la solution du problème connu sous le nom d'équation Pelliane, dont on peut dire que dépend entièrement l'analyse des équations indéterminées du second degré. Les mathématiciens indous ne donnèrent aucune démonstration de leur solution. Elle fut donnée pour la première fois au moins quatorze cents ans plus tard par Lagrange, un des plus célèbres mathématiciens de l'Europe; et le mémoire dans lequel il a exposé sa découverte a toujours été regardé comme un des monuments principaux de son génie. L'équation indéterminée du 1er degré, dont nous avons parlé plus haut, mérite spécialement d'être mentionnée ici, parce qu'elle est susceptible d'applications mécaniques dans la théorie des rouages, et aussi parce qu'elle peut être représentée géométriquement d'une manière fort simple.

Nous devons signaler, pour une raison à peu près semblable, un autre sujet important qui se rattache à la théorie des nombres; nous voulons parler du calcul de tables donnant le plus petit diviseur de chaque nombre, ou s'il s'agit d'un nombre premier, indiquant qu'il n'est pas divisible. De telles tables (qui abrégent considérablement certains calculs) ont été dressées pour les neuf premiers millions; les tables des quatrième, cinquième, et sixième millions existent bien, mais seulement en manuscrit et elles n'ont jamais été publiées. La première tentative pour former une table des nombres premiers a été faite par Ératosthènes, et la méthode en partie mécanique qu'il adopta (appelée d'après son inventeur "le crible d'Ératosthènes") a été admise en principe par ses successeurs, avec les modifications nécessaires.

Les lois de la nature, avec lesquelles nous sommes familiarisés, ont en général si peu l'apparence d'être applicables aux nombres intégraux ou entiers, qu'il nous sera permis d'attirer l'attention sur deux classes importantes de phénomènes qui forment une

exception à cette remarque. Nous voulons parler des lois des combinaisons chimiques et des lois de la cristallographie.

Si nous imaginons des substances chimiques existant à l'état de gaz parfaits, on peut exprimer la loi de la combinaison chimique, sous sa forme la plus abstraite, en disant que si deux gaz parfaits se combinent chimiquement, et forment un composé que l'on suppose aussi à l'état gazeux parfait, les volumes des deux gaz avant leur combinaison, et du gaz résultant de leur combinaison, sont entre eux comme trois nombres entiers.

La loi des nombres entiers à laquelle les faces d'un cristal sont soumises est suffisamment mise en évidence par les modèles qui se trouvent dans la section de minéralogie, et il serait hors de place de la discuter ici.

Cependant il pourrait être à propos de remarquer que les nombres entiers qui se présentent dans les formules, soit en chimie, soit en cristallographie, ne sont jamais considérables. Dans quelques corps organiques le nombre d'équivalents qui entrent dans la formule va jusqu'à des centaines, il est vrai ; mais dans ces cas, à cause de l'imperfection des méthodes d'analyse chimique, les déterminations qui ont été données doivent être regardées comme appelant des corrections. Les "indices" d'une face d'un cristal existant dans la nature dépassent rarement dix.

(2.) Les appareils géométriques et mécaniques pour aider dans les opérations arithmétiques, appliqués aux grandeurs continues, ne sont pas très-nombreux et présentent dans la plupart des cas une importance plutôt théorique que pratique.

Un très-ingénieux instrument de cette espèce, dont l'usage est très-étendu, est la règle à calcul, que l'on peut considérer comme un appareil pour effectuer les multiplications et les divisions au moyen de l'échelle logarithmique; les additions et les soustractions demandées s'effectuant sans calcul par un ajustement particulier de l'instrument même. Le principe dont elle dépend permet de l'employer pour divers buts, de sorte qu'il y a des règles à calcul de formes très-variées et adaptées à différentes fins.

Mais la table de logarithmes à quatre chiffres est un formidable concurrent pour les échelles logarithmiques, et l'on peut douter qu'en ce moment ces inventions réellement belles soient d'un usage aussi commun qu'elles le méritent. L'Exposition en contient une série complète de MM. Aston et Mander, outre l'estimateur du Dr. F. M. Stapff et le calculateur de poche du général De Lisle.

Nous avons à signaler ensuite les instruments pour la résolution des triangles et la solution des équations du second degré ou d'un degré plus élevé. Quelques-uns d'entre eux sont remarquablement ingénieux ; quelques-uns sont utiles par leurs applications à l'enseignement, parce qu'ils servent à illustrer d'une manière très-remarquable, les rapports entre l'arithmétique ou l'algèbre et la géométrie. D'autres encore sont d'un grand intérêt à cause de la difficulté des problèmes qu'ils ont pour but de résoudre, et de la profondeur des principes employés pour leur solution. A cette dernière classe appartient l'intéressante application faite par M. le professeur Sylvester du mouvement de Peaucellier à l'extraction des racines des nombres.

Il faut observer que tous ces appareils donnent seulement des solutions approximatives, et que le degré d'approximation ne peut dépasser une certaine limite. Cela provient, non d'une imperfection dans la théorie des instruments, mais de ce que la solution du problème est donnée par une mesure ; or toutes les mesures sont nécessairement approximatives seulement, et sujettes à des erreurs qui ne peuvent être réduites au-delà d'un certain point.

A cet égard, la solution analytique d'un problème possède un grand avantage théorique sur la solution obtenue par les moyens géométriques ou mécaniques. La solution analytique sans doute n'est aussi qu'approximative, mais le degré de l'approximation n'est plus limité : car si nous ne sommes pas satisfaits du degré d'approximation que nous avons obtenu, nous pouvons aller plus loin et reprendre l'opération, en tenant compte des termes très-petits que nous avions négligés précédemment, jusqu'à ce que nous

arrivions à un résultat aussi approché de la vérité que nous le voudrons. Naturellement cet avantage théorique cesse d'avoir aucune importance pratique, lorsque le degré d'approximation qu'on peut atteindre par l'application mécanique est suffisant pour le but que l'on se propose.

A une époque moins avancée du développement de la science analytique, les méthodes graphiques pour obtenir la solution de problèmes analytiques étaient d'une plus grande importance que maintenant. Lorsque Descartes montra que la solution d'une équation du quatrième degré pouvait dépendre de la détermination de l'intersection d'une parabole par un cercle, il est possible que, au moins dans certains cas, avec les ressources mathématiques limitées que l'on possédait alors, la meilleure méthode pour trouver les racines d'une équation du quatrième degré proposée, eût été de décrire la parabole et le cercle et de mesurer ensuite les ordonnées des points communs aux deux courbes. Mais les progrès continuels des procédés analytiques, joints à la grande facilité de calculer les valeurs arithmétiques des expressions analytiques, résultant de l'invention des logarithmes, ont complètement dépassé la puissance des moyens géométriques, et ces moyens sont maintenant peu usités, excepté pour obtenir de simples approximations. Ainsi c'est le degré de perfection donné à l'analyse, qui l'a mise à même de se dispenser de l'aide de la mécanique, quoiqu'il ne manque pas d'exemples qui puissent servir à démontrer, que les moyens mécaniques peuvent encore recevoir un grand développement dans l'avenir. Nous devons aussi mentionner, à propos des applications du mouvement de Peaucellier, que sir William Thomson a récemment donné les plans d'une machine intégrante, permettant d'intégrer mécaniquement toute équation différentielle ou toute série d'équations différentielles, simultanées, contenant seulement une variable indépendante. Dans le cas important des équations linéaires du second degré à coefficients variables, la construction du mécanisme nécessaire ne présenterait, dans l'opinion de sir W. Thomson, aucune difficulté insurmontable.

Le principe moteur employé dans cette machine intégrante est dû au professeur James Thomson, et consiste dans la transmission de la rotation d'un disque ou d'un cône à un cylindre, par l'intermédiaire d'une sphère libre qui presse par son poids sur le disque et le cylindre, ou sur le cône et le cylindre suivant le cas; la pression étant suffisante pour donner l'adhérence nécessaire par le frottement aux points de contact roulants. Sir W. Thomson propose d'appliquer ce principe à la construction d'une machine appropriée au calcul des constituants harmoniques d'une fonction donnée, et il croit qu'en employant une telle machine dans le calcul des marées, un simple opérateur pourrait être capable de trouver, en une heure ou deux, l'un des éléments harmoniques simples des marées d'une année, représenté par des courbes sur une échelle de marées ordinairement usitée, résultat qui jusqu'ici n'a pas réclamé moins de vingt heures de calcul aux plus habiles arithméticiens. Comme un autre indice de la même tendance à substituer (partout où cela se trouve possible) les combinaisons mécaniques ou graphiques à des calculs abstraits, nous pouvons renvoyer à un excellent traité allemand, "La Statique graphique" du professeur Culmann, qui a déjà exercé une influence puissante sur la marche de l'éducation technique en Allemagne, et dont l'objet est de résoudre des problèmes importants pour les ingénieurs, ayant trait à la solidité des constructions, par de simples dessins géométriques, sans se servir de formules analytiques.

HENRY J. S. SMITH.

INSTRUMENTS ET MODÈLES GÉOMÉTRIQUES.

Après la science des nombres, la science de l'espace est à la fois la plus abstraite, et celle dont les applications à l'étude des phénomènes naturels sont les plus universelles. Tout ce qui a lieu, a lieu dans l'espace : ainsi la géométrie, ou science de l'espace, intervient nécessairement dans toute observation exacte des faits.

Lorsque nous commençons à réfléchir sur l'espace en général, les propriétés qui frappent l'esprit dès l'abord sont sa continuité et son extension indéfinie en apparence ; notre imagination serait peut-être incapable de concevoir l'absence de ces deux propriétés. Nous constatons ensuite l'existence de trois dimensions de l'espace (c'est-à-dire la longueur, la largeur, et la hauteur de tout objet), et nous ne pouvons concevoir qu'il y ait plus ou moins de trois dimensions. Nous observons en outre : 1° qu'en deux points différents quelconques, l'espace est exactement semblable à lui-même, et 2° qu'à partir d'un point quelconque il a des propriétés identiques dans toutes les directions.

Ces assertions générales, si elles ne sont pas réellement évidentes par elles-mêmes, sont au moins facilement admissibles comme s'accordant avec l'expérience universelle. On peut dire qu'elles forment la base de cette représentation analytique de l'espace que nous devons à Descartes, lequel peut à juste titre être considéré comme le fondateur de la géométrie moderne. Dans ce mode de représentation nous regardons l'espace comme un "complexe" (si l'on peut employer cette expression comme une traduction du mot

allemand *Mannigfaltigkeit*), un complexe de trois quantités indéterminées, correspondant aux trois dimensions. Les surfaces, les lignes et les points qui existent dans l'espace, sont ce qu'on appelle dans le langage technique les "lieux" obtenus en introduisant une, deux ou trois conditions restrictives dans ces indéterminées. Comme cela arrive souvent dans des cas semblables, ce mode de représentation est susceptible d'extension de manière à pouvoir s'appliquer à d'autres objets, ou à des conceptions différentes de celles pour lesquelles il avait d'abord été employé; c'est ainsi que les mathématiciens ont été conduits à considérer des complexes de plus de trois indéterminées, ou encore des complexes ne possédant pas les propriétés que nous avons énumérées, comme étant caractéristiques de l'espace. Telle est l'origine d'expressions telles que celle-ci: "Un espace à quatre dimensions," ou d'assertions comme la suivante: "On peut concevoir qu'un espace ne soit pas semblable à lui-même en tous ses points." Ces spéculations ne sont peut-être pas directement propres à faire avancer nos notions sur l'espace dans lequel nous vivons et nous nous mouvons, et auquel elles paraissent absolument inapplicables; mais elles ont eu le mérite de développer nos connaissances sur les relations de quantité, et elles ont eu ainsi indirectement une influence de quelque importance sur les progrès récents de la géométrie.

La méthode cartésienne pour la représentation de l'espace a joué un rôle si prépondérant dans les spéculations géométriques, que peut-être, à un certain degré et dans certains cas, elle a détourné à tort l'esprit des géomètres de cette intuition directe de l'espace, sur laquelle après tout la géométrie doit être fondée. Et il ne peut y avoir de doute qu'une Exposition de modèles, tels que ceux qui sont compris dans le présent catalogue, ne soit destinée à rendre un grand service à la science géométrique, en appelant l'attention sur la forme concrète d'objets trop susceptibles, même pour un esprit sérieux, d'exister seulement comme des conceptions très-imparfaitement réalisées.

Pour le but que l'on se propose dans cette introduction, nous pouvons classer en trois catégories les propriétés de l'espace que nous considérerons, soit comme (1) propriétés de situation; soit comme (2) propriétés graphiques, soit comme (3) propriétés métriques. Nous allons dire quelques mots de ces trois classes de propriétés pour mettre en relief leur importance et leur signification.

(1.) Les propriétés de situation d'une figure dans l'espace, sont celles qui existent, abstraction faite de la grandeur et même de la forme des parties de cette figure, et qui dépendent seulement de la connexion de ces parties et de leur situation les unes par rapport aux autres. Comme, ni le terme de "propriétés de situation," ni la définition que nous venons de donner de ces propriétés, ne peuvent être considérés comme en donnant une image nette, il ne sera pas hors de propos d'exposer un petit nombre d'exemples explicatifs très-simples.

Si nous traçons sur une surface telle qu'un plan, deux figures fermées, de contours même compliqués, il est parfaitement possible qu'elles ne se touchent pas l'une l'autre, ou qu'elles se touchent en un ou plusieurs points, et cependant qu'elles ne se traversent pas. Mais du moment qu'elles se traversent elles doivent se traverser un nombre *pair* de fois, c'est-à-dire deux fois, quatre fois, six fois, etc. La vérité de cette proposition sera facilement saisie, et l'on voit que pour comprendre cette assertion, nous n'avons pas besoin de la conception de grandeur, ni même de la conception d'une ligne droite ou d'un plan.

De même: supposons deux corps dont l'un est une sphère creuse et l'autre un anneau creux, et concevons qu'une personne se place par la pensée dans l'intérieur de ces deux corps creux, successivement. Les deux espaces fermés, dans lesquels elle se trouvera successivement, diffèrent l'un de l'autre au moins en un point remarquable. Il n'y a qu'un chemin pour se transporter d'un point A situé à l'intérieur de la sphère à un autre point B également à l'intérieur de la sphère; sans doute nous pouvons

tracer de A en B autant de routes qu'il nous plaira; mais toutes ces routes sont réellement réductibles à une seule et même route; et un fil élastique reliant A et B pourra être contourné de manière à prendre la forme de chacune d'entre elles. Maintenant, prenons deux points A et B à l'intérieur de l'anneau, on verra d'emblée qu'il y a deux chemins différents, irréductibles l'un à l'autre, par lesquels on peut se transporter de A en B. Nous avons ainsi devant nous un exemple d'un espace en *simple connexion* (l'intérieur de la sphère) et d'un espace en *double connexion* (l'intérieur de l'anneau). La distinction dépend entièrement des propriétés de situation des deux surfaces terminales, et l'on a trouvé qu'elle a quelque importance pour les théories du mouvement des fluides et de l'électricité.

Comme troisième exemple, prenons une bande oblongue de papier, et relions ses deux extrémités de manière à former une portion de surface cylindrique. Prenons une seconde bande de papier semblable à la première, relions encore ses deux extrémités, mais après avoir donné un demi-tour de torsion à la bande, de sorte que les bouts soient en contact par les faces appartenant primitivement à un même côté de la feuille de papier. Entre la surface ainsi formée et la première, qui est cylindrique, on verra qu'il existe une différence importante: la surface cylindrique a une face extérieure et une face intérieure, et il n'y a pas de chemin pour passer de l'une à l'autre, si ce n'est en perçant le papier ou en traversant par dessus le bord; au contraire les deux côtés de la seconde surface forment une nappe parfaitement continue, de telle sorte qu'en nous transportant une première fois tout le long de la bande oblongue, nous devons passer d'un point déterminé au point exactement correspondant de l'autre côté de la surface, et que nous ne pouvons revenir au point de départ qu'en complètant une seconde fois le tour. La différence que nous avons ainsi appris à établir entre les surfaces qui ont deux côtés et celles qui n'en ont qu'un, est une distinction fondamentale, et elle dépend seulement des propriétés de

situation de la figure, telles que nous les avons actuellement définies.

Jusqu'ici il n'a pas été établi de *corps de doctrine* complet des propriétés de situation des figures. Cela provient en partie des grandes difficultés inhérentes à cette étude, en partie du fait que ce n'est que très-récemment que l'attention des mathématiciens a été appelée sur ce sujet par la lumière inattendue que les recherches de cet ordre ont jetée sur quelques-unes des questions les plus obscures du calcul intégral. Nous ne pouvons pas, par conséquent, espérer de trouver de nombreux modèles ou dessins destinés à illustrer cette partie de la géométrie. Mais une grande collection d'objets géométriques ne peut manquer de fournir des exemples de ces propriétés, et ce qui est plus important, pourra suggérer des points de vue entièrement nouveaux dans cette branche d'études, qui plus que toute autre dans le domaine des mathématiques pures, s'appuie sur l'observation directe.

(2.) Les propriétés graphiques de l'espace sont celles qui embrassent les conceptions de la ligne droite et du plan, abstraction faite de toute conception de grandeur ou de mesure. On chercherait en vain dans les Éléments d'Euclide un exemple d'un théorème purement descriptif, quoique, à ce qu'il paraît, l'un des traités perdus de ce grand géomètre, les "Porismes," fût consacré à cette partie de la géométrie. Dans les temps modernes Blaise Pascal et son contemporain plus âgé que lui, Desargues, ont ravivé l'étude des propriétés descriptives des figures. Par une étrange fatalité, les œuvres purement géométriques de ces deux hommes éminents ont été perdues, ou complètement négligées pendant plus d'un siècle, et c'est seulement à une époque relativement récente qu'elles ont attiré l'attention dont elles sont dignes. Comme exemple simple d'un théorème graphique nous pouvons citer cette proposition de Desargues: "Si deux triangles situés dans le même plan sont tels que les lignes joignant leurs sommets pris deux à deux concourent en un même point, les trois points

d'intersection des côtés opposés à ces sommets sont en ligne droite; et l'inverse."

(3.) Enfin les propriétés métriques de l'espace sont celles qui embrassent, implicitement ou explicitement, la considération de grandeur. Telles sont l'ancienne proposition de Pythagore: "Dans un triangle rectangle le carré de l'hypoténuse est égal à la somme des carrés des deux côtés adjacents à l'angle droit," et les théorèmes d'Archimède: "La surface de la sphère est égale à la surface courbe du cylindre circonscrit; le volume de la sphère est les deux tiers du volume de ce cylindre." Ces propositions ne seraient pas intelligibles pour quelqu'un qui n'aurait par la conception de l'égalité de grandeurs géométriques; elles ne pourraient pas être vérifiées par quelqu'un qui n'aurait pas les moyens de prendre des mesures quantitatives exactes. Au contraire, la proposition de Desargues mentionnée ci-dessus est intelligible pour toute personne qui sait ce que c'est qu'une ligne droite et un plan, et elle peut être vérifiée par toute personne qui a une feuille de papier, un crayon et une règle.

Comte a proposé de définir la géométrie: "la science qui a pour but la mesure des grandeurs." Scientifiquement cette définition est probablement insuffisante, car comme nous l'avons vu, une grande partie de la géométrie consiste en propositions qui n'ont aucune connexion avec des mesures. Dans le fait, on doit admettre que les applications de beaucoup les plus importantes de la géométrie aux sciences naturelles et aux besoins de la vie, roulent sur les propriétés métriques des figures. Mais, à un point de vue purement théorique, il y a lieu de croire que les propriétés graphiques de l'espace sont plus universelles et plus profondément reliées à la nature des choses, *notiora naturæ*, comme aurait dit Bacon; tandis que les propriétés métriques sont, en un certain sens, secondaires et dérivées. Comme exemple de ce caractère d'universalité que nous attribuons aux propriétés graphiques, nous pouvons citer ce que l'on a appelé le principe de *dualité* des figures géométriques. D'après ce principe tous les théorèmes purement graphiques sont doubles,

c'est-à-dire que toute proposition graphique relative à des points et à des plans dans l'espace, donne naissance à une autre proposition corrélative de la première, mais dans laquelle les points ont été remplacés par des plans et *vice-versâ*, les lignes joignant deux points étant remplacées par les lignes d'intersection de deux plans.

Nous passons à l'indication des principales classes d'appareils matériels employés dans les recherches géométriques, ou dans les applications de la géométrie aux arts, ou finalement comme moyen d'enseignement.

Nous mentionnerons successivement :

A.—Les instruments pour les dessins ou plans géométriques, et pour copier des dessins ou des plans.

B.—Les instruments pour le tracé de courbes spéciales.

C.—Les modèles de figures dans l'espace.

D.—Les modes de représentation de figures dans l'espace, par des dessins plans.

A.—Instruments employés pour le Dessin géométrique.

La règle et le compas, les deux grands instruments du dessin et de la construction géométriques, sont d'une antiquité très-reculée. Une corde tendue, comme les charpentiers l'emploient encore, a été probablement la plus ancienne forme d'appareil pour obtenir une ligne droite ; et une corde attachée à un piquet (procédé encore adopté par les jardiniers pour tracer une corbeille de fleurs) a fourni le moyen primitif de décrire un cercle. Des compas comme ceux dont nous nous servons maintenant, et beaucoup d'autres de formes très-différentes, ont été retrouvés dans les fouilles de Pompeï. Mais il est probable que l'emploi maintenant universel du compas pour transporter avec exactitude d'une échelle à un dessin, ou d'un dessin à un autre, des longueurs mesurées, n'a guère été pratiqué dans les anciens temps. Si cet emploi eût été général, il est difficile de supposer qu'il n'eût pas rendu inutiles le second et le troisième problème du premier

livre d'Euclide, dans lesquels les longueurs sont transportées par le moyen du tracé effectif d'un cercle.

Parmi des perfectionnements plus récents dans la construction des compas, nous pouvons signaler, 1° les dispositions destinées à un travail très-fin, et connues sous les noms de compas à cheveu, compas à pointe d'aiguille et diviseur à ressort; 2° le compas proportionnel ou de réduction, qui nous permet de diminuer ou d'augmenter dans un rapport quelconque les longueurs que nous transportons d'un dessin à un autre; 3° le compas triangulaire, au moyen duquel la position de trois points formant un triangle peut être transportée d'un dessin à un autre et qui sert ainsi d'instrument pour transporter les angles; 4° le compas à tige, consistant en une tige ou une barre le long de laquelle les deux pointes de l'instrument peuvent se déplacer en arrière ou en avant, leur distance étant susceptible d'être réglée avec une grande précision au moyen d'une vis micrométrique.

Après la règle et le compas, l'instrument dont l'emploi est le plus universel dans tout dessin géométrique est l'échelle des parties égales. Divisons les deux côtés opposés d'un rectangle en un même nombre de parties égales, 10 par exemple, les points de division sur chacun étant numérotés par 1, 2, 3, ... 9, et traçons les lignes 11, 22, 33, ... 99, parallèles aux deux autres côtés du rectangle. Puis divisons ceux-ci pareillement en 10 parties égales, mais joignons les points de division dans une direction oblique par les parallèles 01, 12, 23, 34 . . . . ; nous verrons que la première série de parallèles est divisée en centièmes par la seconde. Une telle échelle diagonale est placée sur toute échelle dite échelle plane, et sert à diviser en centièmes une des divisions primitives. Avec un bon compas nous pouvons réussir à mesurer sur cette échelle toute longueur donnée, avec une erreur qui peut-être n'excède pas un cinq-centième de la division primitive de l'échelle.

Indépendamment de l'échelle des parties égales, on grave ordinairement sur l'échelle plane une échelle des cordes, et une échelle

pour mesurer les arcs. Ce sont les plus simples des dispositions connues pour tracer un angle qui est donné en degrés et minutes, ou pour mesurer approximativement un angle déjà tracé. Avec une bonne échelle des cordes on peut, dit-on, construire un angle exact à une minute près. Mais pour la solution la meilleure et la plus commode de ce problème, "construire un angle égal à un angle donné," nous recourons aux cercles, ou parties de cercles divisés, connus sous les noms de rapporteurs circulaires, semi-circulaires, ou quadrantaux.

Moins élémentaires dans leur théorie que les simples instruments qui précèdent, les arrangements nommés pantographes nous permettent de copier n'importe quelle figure plane à une échelle différente. On connaît deux formes principales de cet instrument, l'ancien pantographe et le pantographe de Milan. Dans chacun d'eux il y a un système articulé où un seul point est absolument fixe. L'articulation est arrangée de telle sorte que deux points situés sur deux barres différentes restent constamment en ligne droite avec le point fixe, et demeurent séparés de celui-ci par des distances qui sont l'une à l'autre dans un rapport invariable. Il suit de là que, si l'on fait décrire à l'un de ces points une figure quelconque, l'autre décrira une figure semblable et semblablement située, le centre de similitude des deux figures étant le point fixe. Dans l'ancien pantographe la similitude est directe, dans celui de Milan elle est inverse ; c'est-à-dire dans le premier cas les figures sont du même côté de leur centre de similitude et dans le second elles sont de côtés opposés.

B.—Instruments destinés au Tracé de Courbes spéciales.

Les dessins géométriques se composent en très-grande partie, mais non exclusivement, de lignes droites et de cercles. La même limitation se rencontre dans toutes les constructions ordinaires de la géométrie théorique. Il a été reconnu que tout problème qui admet une solution, mais qui n'en admet qu'une seule, peut, si les données en sont fournies graphiquement, être résolu au moyen de

la règle seule, c'est-à-dire en traçant seulement des lignes droites, et sans l'aide du compas; et de plus que tout problème *quadratique*, c'est-à-dire admettant deux solutions, mais pas plus, peut être résolu par la règle et le compas. Et même on sait en outre que, pour cet objet, un seul cercle tracé une fois pour toutes serait suffisant au point de vue théorique.

Ces considérations peuvent suffire pour expliquer l'importance très-prépondérante qui s'attache, dans la géométrie théorique, à la ligne droite et au cercle. Mais d'un autre côté la ligne droite et le cercle possèdent en commun une propriété qui leur est spéciale parmi toutes les lignes planes, et dont on ne saurait trop estimer la valeur pour toutes les applications pratiques de la géométrie. Ce sont les seules lignes planes (ou non gauches) dont toute partie peut coïncider exactement avec toute autre. Cette propriété est indispensable dans beaucoup d'arrangements mécaniques, et elle est avantageuse dans tous les cas ou l'exactitude de forme est requise, parce qu'elle fournit un moyen simple de vérifier que cette exactitude a été obtenue. Il n'y a qu'une courbe gauche qui jouisse de la même propriété, savoir l'hélice ou courbe de vis, et c'est précisément parce que toute partie d'une hélice peut être appliquée sur toute autre, que l'arrangement de la vis et de l'écrou est possible, ce qui rend cette courbe si utile en mécanique.

Mais malgré ces prérogatives de la droite et du cercle, le tracé d'autres courbes peut à l'occasion être indispensable dans la géométrie soit théorique soit pratique. Ce n'est nullement une chose facile que de trouver une bonne méthode pour tracer une courbe. La théorie d'une courbe peut être assez bien connue et cependant ne suggérer aucun moyen de la tracer mécaniquement, et un moyen suggéré par la théorie peut ne pas se montrer exact en pratique. De toutes les courbes, après le cercle, l'ellipse semblerait la plus simple et la plus aisée à décrire, et cependant des autorités en cette matière recommandent aux dessinateurs de ne pas essayer la vraie ellipse, mais de composer une imitation de la

demi-ellipse au moyen de six ou sept arcs de cercle dont les centres et les rayons sont convenablement choisis. On prétend qu'une telle imitation en impose même à une œil exercé, quoiqu'il soit bien clair que la courbure de l'ellipse varie par degrés insensibles, tandis que celle de la courbe imitative change brusquement de grandeur aux points de jonction des arcs circulaires.

La découverte de M. Peaucellier, consistant dans la possibilité de construire une articulation susceptible de décrire une ligne droite, est peut-être destinée à amener une révolution dans cette partie de la géométrie. On sait déjà que toutes les sections coniques, et beaucoup des courbes les plus importantes du troisième et du quatrième ordre, peuvent être décrites par des mouvements d'articulation, ou des compas composés, comme les a appelés M. Peaucellier, qui ne sont pas trop compliqués pour travailler d'une manière suivie. Au point de vue théorique les résultats obtenus à cet égard ont une portée bien plus vaste, et le professeur Sylvester a donné de bonnes raisons pour croire que toute courbe géométrique est susceptible d'être tracée par un mouvement d'articulation.

Nous mentionnerons brièvement quelques autres arrangements mécaniques qui peuvent servir à tracer certaines courbes planes.

(1.) L'ellipse ne peut guère être décrite avec grande exactitude au moyen d'un fil fixé à ses deux foyers et tendu par un crayon, à cause de l'extensibilité du fil. Elle peut être tracée comme hypocycloïde ainsi que cela a lieu dans l'appareil de M. A. E. Donkin ; ou bien l'on peut employer les anciens compas elliptiques, ou quelque autre invention plus récente. Si l'on n'a aucun de ces moyens à sa disposition, la meilleure manière d'obtenir facilement une ellipse réellement juste est peut-être de couper obliquement un cylindre exécuté au tour avec grand soin. Les trois sections coniques peuvent être décrites à l'aide du conographe du Dr. Zmurko de Lemberg.

(2.) La cycloïde est la courbe tracée par un point d'une circonférence de cercle qui roule sur une ligne droite ; l'épicycloïde et

l'hypocycloïde sont engendrées de la même manière, avec cette différence, que le cercle roule extérieurement ou intérieurement sur un autre cercle au lieu de rouler sur une droite. Ces définitions ont suggéré divers modes de décrire ces courbes mécaniquement. Un cycloïdographe intéressant est exposé par le Dr. Zmurko.

(3.) M. A. G. Donkin a construit un bel appareil pour décrire les courbes harmoniques. Cette machine peut tracer autant de formes différentes de la courbe $y = a \sin (mx + \alpha) + b \sin (nx + \beta)$ qu'il y a de moyens de faire varier les constantes $a, b, m, n, \alpha, \beta$: le nombre des variations étant pratiquement illimité, excepté pour m et n, qui représentent les nombres des dents dans certaines roues avec lesquelles on ne peut prévoir qu'un nombre limité de changements. La machine offre ainsi à l'œil l'effet de la combinaison de deux courbes harmoniques correspondant à n'importe quelles intensités et phases différentes et à des intervalles différents.

(4.) Plusieurs formes de spirales (ou volutes) sont usitées dans les arts, et on a donné des procédés appropriés pour les tracer. Parmi ces courbes il faut mentionner spécialement la développante de cercle qui fournit le profil convenable pour les dents des roues dentées.

(5.) Nous mentionnerons enfin les courbes épicycloïdales de M. Périgal, et les beaux diagrammes, qui ne sont pas proprement épicycloïdaux, mais d'un type plus compliqué, obtenus au moyen de son appareil géométrique composé.

C.—Modèles de Figures dans l'Espace.

Des modèles de certains solides géométriques, par exemple de ceux que l'on nomme les trois corps ronds, la sphère, le cône droit et le cylindre droit ; des cinq solides réguliers, le tétraèdre, le cube, l'octaèdre, le dodécaèdre et l'icosaèdre, et des diverses formes de prismes, de pyramides et de parallélipipèdes, sont depuis longtemps en usage comme moyens de démonstration dans

l'enseignement.* Toutes ces formes géométriques sont connues des mathématiciens depuis des temps fort anciens, quoiqu'on ait le droit d'être surpris de ce que des recherches relatives à des solides tels que le dodécaèdre et l'icosaèdre aient précédé d'autres études d'un caractère plus élémentaire et en même temps plus important.

A une époque très-récente le grand développement pris par la spéculation géométrique a amené des essais pour reproduire sous une forme matérielle une beaucoup plus grande variété de conceptions géométriques. Nous allons énumérer quelques-unes des plus importantes catégories d'objets de ce genre.

(1.) Modèles de surfaces du second ordre.

Parmi elles, deux des surfaces douées de centre, l'ellipsoïde et l'hyperboloïde à une nappe, ont occupé une grande place dans l'histoire moderne de la géométrie. Nous devons mentionner quelques considérations théoriques importantes que les modèles de ces surfaces ont servi à mettre en lumière.

La courbure d'une surface en un point quelconque peut être de deux sortes : ou bien la surface est, en ce point, entièrement concave d'un côté et entièrement convexe de l'autre, ou bien la surface est, de chaque côté également, en partie concave en partie convexe. La sphère est un exemple de surface de la première espèce ; la surface supérieure d'une selle peut servir d'exemple pour la courbure de seconde espèce. Mais ce sont l'ellipsoïde et l'hyperboloïde qui fournissent des types parfaits de ces deux espèces de courbure.

En tout point d'une surface il existe toujours deux directions, perpendiculaires l'une à l'autre, telles que la courbure soit un maximum suivant l'une et un minimum suivant l'autre. En des points spéciaux, nommés ombilics, la plus grande et la plus petite courbure (et par conséquent toutes les courbures) sont égales entre elles. La sphère a cette particularité que chacun de ses points

* Une collection complète de semblables modèles, exécutée par Stronkoff, est exposée par le comité du Musée pédagogique de Russie.



est un ombilic; par conséquent sur la sphère il n'y a pas de directions de plus grande et de plus petite courbure. Mais sur toute autre surface on peut tracer deux séries de courbes, qui se coupent réciproquement à angle droit, et qui indiquent pour chaque point les directions de plus grande et de plus petite courbure. Ces lignes sont nommées lignes de courbure; elles sont, on peut l'affirmer, perçues par l'œil lui-même sur toute surface. L'ellipsoïde possède quatre ombilics; si un fil fixé à l'un d'eux est tendu contre la surface par un crayon mobile, celui-ci tracera une ligne de courbure, en sorte que si l'ellipsoïde a été une fois moulé, et ses ombilics déterminés, il sera facile de tracer ses lignes de courbure avec une approximation suffisante. Une idée qui a été suggérée depuis longtemps par Monge, c'est qu'une voûte semi-ellipsoïdale constituerait la couverture la plus appropriée pour une salle ovale, qu'elle devrait être appareillée suivant les lignes de courbures, et que les ombilics seraient les centres d'éclairage les plus convenables.

Toute surface du second ordre est ou *ombilicale* ou *rectiligne;* c'est-à-dire, ou bien elle possède des ombilics, ou bien elle est susceptible d'être engendrée par le mouvement d'une ligne droite; mais elle ne peut pas réunir ces deux propriétés. L'ellipsoïde, comme nous venons de le voir, est ombilical; l'hyperboloïde à une nappe est rectiligne, et les deux systèmes de droites qui sont situées sur cette surface se voient très-bien sur un modèle de celle-ci. On verra que par chaque point de la surface il passe une droite de chaque système, mais que jamais deux lignes du même système ne se rencontrent. Le paraboloïde hyperbolique, qui peut être regardé comme une variété de l'hyperboloïde à une nappe, est caractérisé par des propriétés semblables. L'Exposition contient une belle série de modèles de ces deux surfaces, exécutés en 1872 par M. Fabre de Lagrange pour le Musée de South Kensington. Une série de modèles en carton de surfaces du second ordre (le cône, le cylindre, l'ellipsoïde, les deux hyperboloïdes et les deux paraboloïdes) est également exposée par le

professeur Henrici, de University College, et par le professeur Brill de Munich. Ces modèles montrent très-clairement les sections circulaires des diverses surfaces, ayant été effectivement construits au moyen de ces sections, à l'exception du paraboloïde hyperbolique, dans lequel (ainsi que dans les cylindres hyperboliques et paraboliques) de telles sections n'existent pas à strictement parler.

(2.) Modèles de surfaces du troisième ordre.

Une série complète de modèles de surfaces du troisième ordre est une chose qu'on n'a pas encore essayé de faire ; et on peut bien dire que notre connaissance de ces surfaces est encore trop imparfaite pour justifier une pareille tentative. Néanmoins des modèles de certaines de ces surfaces ont été faits, et nous mentionnerons un petit nombre de propriétés importantes qu'ils servent à faire ressortir.

(*a.*) Comme nous l'avons déjà dit, les deux courbures d'un ellipsoïde sont partout dirigées dans le même sens, tandis que celles d'un hyperboloïde sont partout dirigées dans des sens différents. Mais généralement parlant une surface courbe se compose de deux régions sur l'une desquelles les courbures sont de même sens, et sur l'autre de sens opposés. Ces deux régions sont séparées par une ligne limité, appelée dans la science la courbe parabolique. Des surfaces du troisième ordre offrent des exemples typiques de ces généralités géométriques. Un exemple d'une nature moins parfaite nous est fourni par la figure du tore (celle d'un anneau d'ancre ou d'une alliance) où la courbe parabolique consiste dans les deux cercles sur lesquels le tore reposerait s'il était placé sur un plan horizontal.

(*b.*) Partout où les deux courbures d'une surface sont opposées l'une à l'autre, il existe sur la surface deux séries de lignes le long desquelles la surface est infléchie ; c'est-à-dire qu'en tout point de la surface, ces deux lignes séparent les directions dans lesquelles la courbure se trouve dans un sens, d'avec celles où elle se trouve dans l'autre. Sur l'hyperboloïde ces " courbes des tan-

gentes principales," comme les nomment les auteurs allemands, sont représentées par les génératrices rectilignes ; les surfaces du troisième ordre nous fournissent les exemples les plus simples du cas général où elles ne sont pas droites, mais courbes. L'œil peut percevoir ces courbes sur une surface, quoique, cela va sans dire, d'une manière simplement approximative. Les deux lignes passant par chaque point sont également inclinées sur les lignes de courbure en ce point ; elles ont une importance théorique encore plus grande que celle des lignes de courbure, parce que leur définition est graphique et non métrique.

(*c.*) En règle générale trois lignes de courbure passent par un ombilic. Cette propriété des ombilics n'existe pas chez les suraces du second ordre ; le premier exemple qu'on en rencontre appartient à celles du troisième. Elle s'aperçoit clairement dans le modèle que le professeur Henrici a fait de la surface cubique $xyz = k^3 (x + y + z - 1)^3$.

(*d.*) Un modèle d'une surface du troisième ordre doit faire ressortir une des propriétés les plus caractéristiques de ces surfaces, celle de contenir un certain nombre fini de lignes droites. Le nombre maximum de ces lignes est vingt-sept, et le modèle exposé par le Dr. Wiener présente ce maximum. Un modèle montrant la disposition de ces droites elles-mêmes dans l'espace, sans l'accompagnement de la surface sur laquelle elles se trouvent, a été construit par le professeur Henrici.

Dans le modèle (*c.*) mentionné tout à l'heure, les vingt-sept lignes sont toutes réelles, mais elles coïncident par séries de neuf, en sorte qu'il semble y en avoir seulement trois.

(3.) Modèles de surfaces réglées on rectilignes.

Les surfaces réglées ou rectilignes sont celles qui sont engendrées par le mouvement continu d'une droite dans l'espace, et que, pour cette raison, on peut considérer comme composées d'un nombre infini de lignes droites. Il existe une grande variété de modèles de ces surfaces, parce qu'ils peuvent être construits avec des fils, ou bien être taillés dans une matière solide, ou

moulés avec une matière plastique. Ils ne sont naturellement qu'approximatifs ou diagrammatiques, les génératrices étant représentées seulement en nombre suffisant pour fournir à l'œil une impression exacte de la forme de la surface. Les surfaces réglées sont de deux espèces très-différentes ; on les nomme développables ou gauches, suivant que les génératrices successives se coupent ou ne se coupent pas. L'hyperboloïde peut être pris comme exemple des surfaces gauches : on peut le définir comme étant la surface engendrée par une droite qui se meut en étant assujettie à s'appuyer sur trois droites fixes qui ne se rencontrent pas dans l'espace. Dans le paraboloïde hyperbolique la génératrice s'appuie sur deux droites fixes en demeurant toujours parallèle à un plan fixe ; cette surface est le spécimen le plus simple de la famille de surfaces gauches qu'on nomme les conoïdes. La série de M. Fabre de Lagrange contient plusieurs modèles de surfaces conoïdales ; elles sont toutes engendrées par le mouvement d'une droite qui demeure continuellement parallèle à un plan fixe et qui en même temps s'appuie constamment sur une droite fixe et sur une ligne quelconque fixe dans l'espace. La surface de la vis à filet carré (ou, plus précisément, la surface formée en menant de tous les points d'une hélice des perpendiculaires à l'axe de celle-ci) nous fournit un exemple familier d'une surface conoïdale. Dans l'hélicoïde gauche de M. Fabre de Lagrange les droites menées des points de l'hélice à l'axe ne sont pas perpendiculaires à celui-ci, mais font avec lui un angle constant. Le progrès récent de la géométrie a conduit à une étude attentive des surfaces gauches du troisième, du quatrième et du cinquième ordres. Des modèles ont déjà été faits de quelques-unes d'entre elles ; un modèle de la surface cubique nommé le cylindroïde est exposé par le Dr. Ball, astronome royal d'Irlande.

Les surfaces développables forment une classe de surfaces tout à fait *sui generis*. On les nomme *développables*, parce que si une telle surface est formée d'une membrane flexible et inextensible, elle peut être développée, c'est-à-dire appliquée sur un plan sans

déchirure ni duplicature. Les cônes et les cylindres sont les exemples les plus simples de surfaces développables, mais ils sont loin de donner une idée complète de leur caractère général. On peut s'en faire une idée plus typique en considérant toutes les droites tangentes à une courbe gauche quelconque. On verra que toutes ces tangentes forment une surface développable et que la courbe gauche forme une arête de rebroussement ou ligne cuspidale sur la surface. Cette arête de rebroussement est caractéristique d'une surface développable ; dans le cône elle se réduit à un point, et dans le cylindre ce point est à l'infini. Comme une surface développable, quand on la fait rouler sur un plan ou sur une autre surface développable, a une *ligne* de contact avec celle-ci, tandis qu'en général deux surfaces qu'on fait rouler l'une sur l'autre ont seulement un *point* de contact, on comprend que ces surfaces soient d'une grande importance dans les arts de construction. Mais, à un point de vue théorique, il faut surtout signaler ce qui est rendu visible par un modèle d'une semblable surface : 1° qu'en chaque point de la surface une des deux courbures est infinie, la génératrice étant toujours une des lignes de courbure ; 2° que tandis que dans les autres surfaces chaque plan tangent a une infinité de plans tangents très-voisins de lui (parce que l'on peut passer d'un point de la surface à un autre point adjacent par une infinité de chemins différents), il n'en est pas ainsi dans le cas des surfaces développables, mais que chaque plan tangent est précédé et suivi par un autre plan tangent, seulement ces plans forment en fait une série simplement infinie, au lieu d'une série doublement infinie. Il suit de là que dans la dualité de l'espace, à une surface développable correspond une ligne courbe, tandis qu'à une surface non développable correspond une autre surface non développable. Comme exemple facile à comprendre et à se rappeler, d'une surface développable, nous devons mentionner l'hélicoïde développable de M. Fabre de Lagrange.

Beaucoup des modèles de surfaces réglées dont nous avons parlé sont disposés de façon à être susceptibles de *déformation ;*

c'est-à-dire que leur forme peut être modifiée en changeant la forme, ou la situation relative des courbes ou droites directrices qui règlent le mouvement de la génératrice. Par là le même modèle est rendu capable de prendre successivement les formes de plusieurs surfaces différentes; et l'étude des transformations par lesquelles on passe de l'une à l'autre de ces formes, présente une importance et un interêt très-grands.

Les modèles de carton du professeur Henrici permettent également la déformation, attendu que l'angle dont les deux plans de section circulaire sont inclinés l'un sur l'autre peut être changé.

(4.) Modèles de certaines surfaces spéciales.

(*a*.) Surfaces de Plücker.

Tout récemment les propriétés des systèmes de lignes dans l'espace ont été étudiées avec une grande ardeur, principalement par les géomètres allemands. On est conduit à la considération de ces systèmes par beaucoup de problèmes géométriques (par exemple l'étude des droites qui coupent à angle droit une surface donnée, et que l'on nomme les normales à cette surface), mais elle s'impose également à notre attention dans toutes les recherches optiques qui ont pour objet les propriétés de systèmes de rayons. Un intérêt encore plus grand s'attache à l'étude des systèmes de droites dans l'espace, puisque la recherche de leurs propriétés est un préliminaire indispensable à celle des propriétés des systèmes de courbes; et ces derniers se présentent à chaque pas dans la physique, comme lignes d'eau dans l'hydrodynamique, comme lignes de flux dans la théorie de la propagation de la chaleur par conductibilité, comme lignes de force dans les théories de l'électricité et du magnétisme.

La présente collection offre une belle série de modèles d'une classe de surfaces qui se trouvent jouer un rôle important dans la théorie des systèmes rectilignes. Un certain intérêt historique s'attache à ces modèles: ce sont les copies de ceux qui furent présentés en 1866, à la réunion de l'Association britannique à Nottingham, par le célèbre mathématicien Julius Plücker,

auquel, plus qu'à tout autre, nous sommes redevables de ce que nous savons de la géométrie des systèmes de lignes. Ils ont été éxécutés par Epkens, de Bonn, et présentés par le Dr. Hirst, à la Société mathématique de Londres. Le professeur Hennessy, du Collége royal des sciences pour l'Irlande, expose aussi une série de modèles destinés à expliquer les recherches de Plücker.

(*b.*) La surface des ondes.

L'importance de cette surface dans la théorie ondulatoire de la lumière est son principal titre à l'attention. Mais, indépendamment de toute interprétation physique, ses propriétés géométriques lui donnent le droit de figurer dans une collection de modèles de cette nature. Elle nous fournit un exemple d'une surface fermée à deux nappes, dont l'une est à l'intérieur de l'autre; c'est une surface *apsidale*, et sa surface réciproque est de la même nature qu'elle-même ; enfin elle offre des exemples typiques de la singularité qu'on nomme un nœud conique, et de la singularité corrélative d'un plan tangent touchant une surface le long d'une section conique (dans le cas de la surface des ondes cette section conique est un cercle). L'étude géométrique de ces particularités a conduit sir William Rowan Hamilton à sa célèbre découverte des phénomènes optiques de la réfraction conique externe et interne.

(*c.*) La surface de Steiner.

Le professeur Cayley expose un modèle brut de cette surface, qui a été l'objet d'une grande attention parmi les mathématiciens, parce qu'elle est la polaire réciproque de la surface cubique à quatre nœuds coniques, et parce qu'elle jouit de la propriété que chaque plan tangent la coupe suivant deux sections coniques.

(*d.*) La surface amphigène du professeur Sylvester.

Cette surface est d'une grande importance dans la théorie des équations du cinquième degré. Le professeur Henrici en a préparé un modèle.

(*e.*) Surfaces de courbure constante.

La courbure totale d'une surface en un point est le produit de

deux courbures principales en ce point; elle est positive ou négative suivant que les courbures principales sont de même sens ou de sens opposés. C'est un théorème géométrique important que, si deux surfaces inextensibles et flexibles ont aux points correspondants la même courbure totale, chacune d'elles peut être développée sur l'autre sans déchirure ni duplicature. Ainsi toute surface de courbure positive constante peut être développée sur une sphère. Les surfaces de courbure négative constante ne peuvent évidemment pas être développées sur une sphère; mais elles possèdent un grand intérêt théorique qui leur est propre, en ce que l'on a reconnu que la géométrie des figures tracées sur ces surfaces est précisément ce que deviendrait la géométrie d'Euclide si nous y supprimions la proposition connue sous le nom de onzième axiome. Des modèles de ces deux classes de surfaces sont fournis par le professeur Henrici.

(5.) Modèles cristallographiques.

Les uns sont des modèles des polyèdres géométriques (solides terminés par des faces planes) qui se rencontrent réellement dans la nature; les autres sont destinés à servir d'explication à la théorie de la cristallographie et à montrer les relations des faces planes d'un cristal avec ses axes cristallographiques.

D.—Représentation de Figures dans l'Espace à l'Aide de Dessins sur un Plan.

Passons pour terminer aux modes de représentation des figures dans l'espace par des dessins sur un plan. Nous avons ici à notre disposition les méthodes ordinaires de la perspective. Mais leur usage pratique est trop dépendant de la main et de l'œil de l'artiste pour satisfaire aux exigences de la rigueur géométrique. La méthode connue sous le nom de "géométrie descriptive" est par conséquent préférée en vue du dessin géométrique. Cette méthode consiste à représenter un objet dans l'espace à l'aide de ses projections orthogonales sur deux plans rectangulaires entre

eux. Aussi on ne peut guère dire qu'elle soit de date récente, puisqu'au fond elle revient à représenter la figure dans l'espace en plan et en élévation. Mais c'est peut-être à Monge qu'est due l'idée de placer le plan et l'élévation sur la même feuille et de les traiter (pour la construction géométrique) comme une figure plane ; et c'est à lui certainement qu'est dû le développement des principes de la méthode en un système complet et scientifique. Les atlas qui accompagnent les ouvrages sur la géométrie descriptive (et depuis Monge il y en a eu un nombre considérable) offrent des applications nombreuses et variées de la méthode. Mais on a aussi construit des modèles qui servent à montrer au lecteur les relations de l'objet répresenté avec ses deux projections, et de celles-ci entre elles. Nous indiquerons entre autres les diagrammes et modèles exposés par le professeur Franz Tilser, de Prague, par le professeur O. Reynolds, d'Owens collége à Manchester, par le Comité du Musée pédagogique de Russie, et par le professeur Pigot du Collége royal des sciences pour l'Irlande.

Les épures de géométrie descriptive, quoique exactes, et utiles pour les buts de construction, n'aident guère l'imagination à concevoir des figures géométriques compliquées. Mais ce secours est efficacement fourni par les représentations stéréoscopiques; et il est sérieusement à désirer que les applications de la stéréoscopie à la géométrie reçoivent dans la suite plus de développement que cela n'a été le cas jusqu'ici. Tout polyèdre peut être représenté extraordinairement bien par le stéréoscope, les arêtes seulement du polyèdre étant tracées sur les deux moitiés de la feuille stéréoscopique. On pourrait de la même manière représenter toute courbe gauche et toute surface développable, en indiquant d'abord la courbe gauche qui en forme la ligne cuspidale, puis un nombre suffisant de droites tangentes à cette courbe. De même pour représenter une surface réglée gauche, il suffirait d'indiquer stéréoscopiquement un certain nombre de ses génératrices. Les surfaces non-réglées pourraient, théoriquement du moins, être réprésentées par un nombre suffisant de leurs lignes de courbure,

ou à l'aide de leurs courbes des tangentes principales quand ces courbes existent. Il faut cependant admettre que le tracé exact des diagrammes-plans, nécessaires pour de telles représentations, serait sujet à des difficultés pratiques très-sérieuses, et qu'il vaudrait mieux les éviter en employant des méthodes spéciales adaptées à chaque surface en particulier ; ainsi, dans le cas de l'ellipsoïde et des autres surfaces ombilicales du second ordre, en employant deux systèmes de sections circulaires.

HENRY J. S. SMITH.

INSTRUMENTS EMPLOYÉS AUX MESURES.

PAR *mesures*, scientifiquement parlant, on entend l'estimation de *quantités*. Dans chaque sujet spécial, il y a des quantités à mesurer ; celles-ci sont très-variées, comme on le verra par la liste suivante, concernant la géométrie et la dynamique.

Quantités géométriques.

Longueurs.
Surfaces.
Volumes.
Angles (planes ou solides).
Courbes (plans ou solides).
Extensions (allongements, torsions, ruptures).

Éléments du mouvement.

Temps.
Rapidité.
Moments.
Accélération.
Force.
Travail.
Cheval-vapeur.
Température.
Chaleur.

Propriétés des corps.

Masse.
Poids.
Densité.
Pesanteur spécifique.
Élasticité.
Viscosité.
Diffusion.
Tension superficielle.
Chaleur spécifique.

Malgré les caractères différents de ces quantités, elles sont toutes ramenées à la même unité, et déterminées par la même méthode. Chaque quantité est mesurée en trouvant une *longueur* proportionnelle à cette quantité et en mesurant cette longueur. Ceci sera peut-être mieux compris si l'on examine un ou deux exemples.

Dans la plupart des instruments scientifiques on a à mesurer des *angles*. L'opération consiste toujours à déterminer la longueur d'un arc sur un cercle gradué, la circonférence de ce cercle étant divisée non en pouces ou centimètres, mais en degrés et fractions de degrés, c'est-à-dire en parties aliquotes de la circonférence totale.

Pour faciliter leur mesure finale, quelques quantités, par exemple la force mécanique, sont représentées sous forme d'*aires*, et l'on peut croire que cette méthode prendra de l'extension. Les instruments destinés à mesurer des aires se nomment planimètres ; l'un des plus simples est celui d'Amsler, qui consiste en deux règles réunies ; l'extrémité de l'une d'elles est fixe, et celle de l'autre tourne autour de la surface à mesurer. La seconde règle repose sur une roue qui tourne avec elle, et la géométrie démontre que l'aire est proportionnelle au chemin parcouru par la roue. La mesure de l'aire est donc réduite à la mesure d'une longueur.

Les volumes peuvent être évalués de diverses manières, mais dépendant toutes d'un même principe. Les quantités de terre excavée, dans les travaux d'ingénieur, sont déterminées d'après l'estimation approximative de la forme de la cavité, c'est-à-dire par la mesure de ses *dimensions*. On peut estimer de même le contenu d'un récipient ; mais le procédé le plus précis consiste à le remplir d'un liquide, puis à verser ce liquide dans un cylindre dont on connaît la section ; la quantité est alors déterminée par la hauteur du liquide dans le cylindre, c'est-à-dire par une longueur.

Le volume de solides irréguliers peut se mesurer aussi par leur immersion dans un liquide contenu dans un cylindre calibré, et en observant la hauteur du liquide ; c'est-à-dire par la mesure d'une

longueur. L'appareil qui sert à cette opération porte le nom de stéréomètre. Le liquide doit être de telle nature qu'il n'exerce aucune action chimique sur le solide immergé et qu'il en mouille la surface pour qu'il n'y reste pas de bulles d'air adhérentes. C'est ainsi qu'on se sert de mercure dans le cas des métaux employés pour les étalons.

Le *temps* se mesure d'ordinaire par la longueur de l'arc parcouru par une aiguille tournant sur un cadran circulaire. En astronomie on le mesure quelquefois en comptant les battements d'une horloge frappant les secondes et en estimant mentalement les fractions de seconde ; dans les cas où l'on cherche la durée d'une oscillation, on la détermine en comptant le nombre des oscillations pendant un temps considérable, et on divise le temps par ce nombre. Mais le moyen de beaucoup le plus précis de mesurer le temps, consiste à tracer une ligne au crayon sur une feuille de papier enroulée autour d'un cylindre tournant, ou à faire mouvoir un point lumineux sur une surface photographique sensible. Si l'on fait mouvoir un crayon le long du cylindre de manière à indiquer au fur et à mesure ce qui se passe à différents moments, on pourra mesurer la durée de chaque phénomène en déroulant le cylindre et en mesurant les distances entre les marques tracées sur la feuille, à la condition qu'on connaisse exactement la durée de la révolution du cylindre. C'est par cette méthode que Helmholtz à mesuré la vitesse de la transmission nerveuse.

Un des cas les plus fréquents de la mesure d'une *force*, est l'emploi du baromètre, qui donne la valeur de la pression atmosphérique par unité de surface. On la détermine par la hauteur de la colonne de mercure à laquelle elle fait équilibre (baromètre à mercure), ou par la déformation d'une boîte métallique dont l'air a été enlevé (baromètre anéroïde). Dans le premier cas la hauteur peut se mesurer directement, ou bien elle peut être transformée en déviation d'une aiguille, qui se lit ensuite comme une longueur d'arc sur un cercle divisé ; dans le second cas la

déformation est toujours indiquée par une aiguille tournant sur un cercle gradué.

On mesure à l'aide de la balance, la *masse* et le *poids* (qui est proportionnel à la masse) de différents corps dans le même lieu. Au premier abord cette méthode semble différente de celles que nous avons examinées jusqu'ici, car nous plaçons le corps à mesurer dans un des plateaux, et dans l'autre des poids connus jusqu'à ce que l'équilibre soit établi, puis nous comptons les poids. Mais dans une romaine le poids est déterminé à l'aide d'une mesure de longueur; et dans une balance appropriée à des observations scientifiques les deux méthodes sont employées: on obtient une approximation aussi grande que possible au moyen des poids, et on mesure le reste en déplaçant le long du fléau un petit cavalier métallique dont la position détermine le poids; c'est là encore une mesure de longueur.

Pour mesurer des poids dans différents lieux, on emploie une balance à ressort, et le poids est déterminé par l'allongement du ressort; ou bien on mesure la longueur du pendule à secondes, d'où l'on peut déduire la force de gravité d'une masse donnée. Cette dernière opération donne un exemple de la méthode habituelle et pratique de la mesure des forces mises en jeu, par un déplacement ou une tension; c'est-à-dire en mesurant la durée des oscillations qu'elles produisent.

Il semble inutile d'examiner d'autres exemples, puisque toutes les autres quantités sont mesurées par des quantités géométriques ou dynamiques proportionnelles; tel est le cas de la température par la hauteur du mercure dans un thermomètre; de la chaleur par la quantité de glace qu'elle peut fondre (le volume d'eau qui en résulte); de la résistance électrique par la longueur d'un fil étalon qui présente une résistance équivalente. Il reste donc seulement à faire voir comment, après avoir trouvé une longueur proportionnelle à la quantité que l'on veut déterminer, on parvient à mesurer cette longueur elle-même.

Pour les calculs approximatifs, tels que la mesure de la longueur

d'une chambre avec une règle d'un pied, on pose la règle bout à bout et on compte le nombre de fois qu'on a dû la placer. Pour la partie qui reste on y applique la règle et on compte le nombre de pouces. Ou si nous voulons estimer approximativement une longueur dans un but scientifique, nous l'exprimerons en mètres ou centimètres. Mais s'il faut l'obtenir d'une manière plus précise, il faudra l'exprimer en centièmes, millièmes, ou millionièmes de millimètres; c'est ce qui se fait par la comparaison avec une échelle.

Pour estimer une longueur en aussi petites quantités, il faut l'amplifier; on y parvient de trois manières. D'abord, géométriquement au moyen de ce que l'on appelle un vernier. C'est une échelle mobile, qui glisse sur une échelle fixe, les divisions de l'échelle mobile différant d'un dixième de celles de l'échelle fixe. Pour mesurer une fraction de division, on cherche à quelle division du vernier se produit la coïncidence des traits; ce chiffre indique des dixièmes de division. La quantité à mesurer se trouve ici multipliée géométriquement par dix. En second lieu par un procédé optique, en regardant la longueur de l'échelle avec un microscope ou un télescope. Troisièmement par un moyen mécanique, soit par une vis surmontée d'un disque à bord gradué nommée vis micrométrique. Si le pas de la vis est $\frac{1}{10}$ et le rayon du disque 10 fois celui de la vis, le mouvement est multiplié par 100. Ces deux derniers procédés sont combinés dans un instrument nommé microscope micrométrique. Un autre instrument amplifiant mécaniquement est un miroir tournant et réfléchissant la lumière sur un écran à quelque distance, comme dans le galvanomètre réflecteur de Thomson.

Toutefois, à proprement parler, toute estimation de longueur rapportée à une mesure étalon est imparfaite et seulement approximative. Le vrai moyen d'indiquer une longueur est de tracer une ligne droite qui la représente, sur une échelle fixe. Cela se fait au moyen d'instruments enregistreurs, qui mesurent les longueurs à intervalles réguliers sur un cylindre, comme nous l'avons dit plus

haut. Ce n'est que par cette représentation graphique des quantités, que les lois de leurs variations se manifestent, et qu'on peut aborder les plus importantes questions de mensuration, consistant à déterminer les rapports de deux quantités variant simultanément.

W. K. CLIFFORD.

CINÉMATIQUE, STATIQUE ET DYNAMIQUE.

Science du mouvement.

La géométrie nous fait connaître les dimensions, les formes et les distances des objets; pour déterminer les dimensions et les distances nous devons mesurer des longueurs; pour déterminer les formes, nous devons mesurer des angles. La science du mouvement, qui est l'objet de la présente esquisse, nous fait connaître les changements qui ont lieu d'un instant à un autre dans ces dimensions, ces formes et ces distances. On dit qu'un corps se meut, quand il change de place ou de position, c'est-à-dire quand la distance qui le sépare des objets environnants se modifie. Quand les parties d'un corps se meuvent relativement les unes aux autres, c'est-à-dire quand leurs distances mutuelles se modifient, le corps change ou de dimensions ou de forme, ou de toutes deux. Tous ces changements sont examinés dans la science du mouvement.

Ciné-matique.

Elle se divise en deux parties: la description exacte du mouvement, et la recherche des circonstances qui président à des mouvements déterminés. A son tour la description du mouvement se subdivise en deux parties; dans l'une on recherche *quels* sont les changements de position qui ont lieu, et dans l'autre *quand* et *en combien de temps* ils ont lieu. Nous pourrions, par exemple, décrire le mouvement des aiguilles d'une horloge, et dire qu'elles tournent sur leurs axes au centre du cadran de manière que l'aiguille des minutes fasse douze fois autant de

chemin que celle des heures; voilà la première partie de l'étude du mouvement. Nous pourrions aller plus loin et dire que, quand l'horloge marche d'une manière correcte, ce mouvement a lieu uniformément et de telle sorte que l'aiguille des minutes fasse un tour complet par heure; ce serait la seconde partie de l'étude. La première partie est ce qu'Ampère avait nommé la cinématique: elle étudie la dépendance qui existe entre les mouvements des différentes parties d'une machine en raison du mécanisme qui les rend connexes. C'est évidemment une application de la géométrie seule, n'exigeant pas d'autres mesures que celles qui appartiennent à la géométrie, à savoir des mesures de longueurs et d'angles. Mais le nom de cinématique est étendu aujourd'hui d'une manière plus commode, de manière à comprendre également la seconde partie de l'étude du mouvement, celle qui recherche quand et avec quelle vitesse il a lieu. Ceci exige en outre la mesure du temps, dont la géométrie n'a pas à s'occuper. Le mot cinématique vient du grec *kinêma*, "mouvement;" et par suite il est également approprié au sens restreint que lui donnait Ampère et au sens plus large qui est maintenant adopté. Comme les principes de cette science président à la construction, non-seulement des appareils scientifiques, mais encore des instruments et des machines, il est utile d'examiner avec quelque détail les principales données dont elle s'occupe.

Dynamique. La partie de la science qui traite des circonstances dans lesquelles des mouvements déterminés s'accomplissent, se nomme la *dynamique*. Il se trouve que le changement de mouvement d'un corps dépend de la position et de l'état des corps environnants, suivant certaines lois simples: le taux du changement qu'éprouve la quantité de mouvement, quand on l'envisage comme dépendant ainsi des corps environnants, se nomme *force*. De là le nom de dynamique, qui vient du grec *dynamis*, "force." Le mot *force* est ici employé dans un sens technique, particulier à la science du mouvement; la connexion qui existe entre cette signification et celle que

le mot possède dans le langage ordinaire sera expliquée dans la suite.

Statique et cinétique.

La dynamique se divise à son tour en deux branches : l'étude des circonstances dans lesquelles un corps peut rester en repos se nomme *statique*, et celle des circonstances du mouvement effectif se nomme *cinétique*. La partie la plus simple de la statique, la théorie du levier, a été étudiée avec succès avant toute autre partie de la science du mouvement, par Archimède, lequel a prouvé que quand un levier à bras inégaux est en équilibre sous l'action de poids suspendus à ses extrémités, ces poids sont en raison inverse des longueurs des bras. Mais aucun progrès réel dans la détermination des conditions du repos n'était possible avant que les lois du mouvement effectif eussent été étudiées.

Translation des corps rigides.

Pour en revenir à l'étude du mouvement, c'est-à-dire à la cinématique, nous devons avant tout classer les divers changements de position, de dimension et de forme, dont nous aurons à nous occuper. Nous disons qu'un corps est *rigide* quand, durant le temps où nous le considérons, il change seulement de position, mais pas de dimension ni de forme. Il est probable que tout corps réel éprouve constamment de légers changements de dimension et de forme, même quand nous ne pouvons pas les apercevoir ; mais dans la cinématique, comme dans beaucoup d'autres sujets, il y a un grand avantage à ne parler que d'une chose à la fois. Aussi avant tout nous recherchons les changements de position, dans l'hypothèse qu'il n'y a pas de changements de dimension ni de forme ; ou, en langage technique, nous traitons du mouvement des corps rigides. Ici il y a une distinction importante à faire entre le mouvement de simple déplacement d'un corps, d'une place à une autre, et celui de rotation. Ainsi les roues d'une locomotive, non-seulement voyagent le long de la ligne, mais elles tournent constamment ; tandis que la bielle d'accouplement, qui relie deux roues situées du même côté, reste toujours horizontale quoique ses changements de position soient

très-compliqués. Un changement de place dans lequel il n'y a pas de rotation se nomme *translation*. Dans une rotation les différentes parties du corps se meuvent de manières différentes, mais dans une translation elles se meuvent toutes de la même manière. Par conséquent, il suffit, pour décrire une translation, de spécifier le mouvement d'une seule particule du mobile, en entendant par *particule* une portion de matière assez petite pour qu'il ne soit pas nécessaire de tenir compte des différences entre ses propres parties, et qui peut par conséquent être envisagée dans le calcul comme un point.

Nous sommes ainsi ramenés au problème très-simple de décrire le mouvement d'un point. Il y a certains cas particuliers de ce problème auxquels on a accordé beaucoup d'attention, parce qu'ils se présentent fréquemment dans la nature ; tels sont le mouvement parabolique, le mouvement harmonique simple, le mouvement elliptique. Nous allons essayer en quelques mots d'expliquer chacun d'eux.

Mouvement parabolique. Le mouvement d'un projectile, c'est-à-dire d'un corps lancé dans une direction quelconque et tombant sous l'action de la gravité, a été étudié par Galilée, et c'est le premier problème de cinétique qui ait été jamais résolu. Nous nous en tiendrons ici à la description du mouvement, sans nous préoccuper de la dépendance où il se trouve de la présence de la terre à une certaine distance du corps mobile. Galilée a trouvé que la trajectoire de ce corps, c'est-à-dire la courbe qu'il décrit, est une parabole, courbe qu'on peut définir : l'ombre projetée sur une table horizontale par un cercle, dont le point le plus élevé est juste de niveau avec la flamme de la bougie qui éclaire.

Il est commode d'envisager séparément le mouvement vertical et le mouvement horizontal, car, suivant une loi posée postérieurement par Newton sous une forme générale, ils ont lieu d'une manière tout à fait indépendante l'un de l'autre. En ce qui concerne son mouvement horizontal, le projectile se meut d'une manière uniforme, comme s'il glissait sur de la glace parfaitement

unie; en ce qui concerne le mouvement vertical, il se meut comme s'il tombait d'aplomb. La nature de ce mouvement vertical peut être définie de deux manières, dont chacune implique l'autre. En premier lieu un corps qui tombe se meut de plus en plus vite; et la vitesse avec laquelle il avance à un moment donné est exactement proportionnelle au nombre de secondes qui se sont écoulées depuis son départ. Ainsi sa vitesse descendante s'accroît continuellement suivant un taux uniforme. En second lieu la distance parcourue depuis le point de départ est proportionnelle au carré du nombre des secondes écoulées; ainsi en trois secondes un corps tombera d'une hauteur neuf fois plus grande qu'en une seconde. La dernière de ces propositions a été prouvée expérimentalement par Galilée; non pas, il est vrai, dans le cas de corps tombant verticalement, car ils se meuvent trop vite pour se prêter à des mesures commodes, mais dans le cas de corps qui descendent le long de plans inclinés et dont la loi est d'abord présumée, et ensuite prouvée être identique à celle des premiers. La première proposition, c'est-à-dire l'uniformité d'accroissement de la vitesse, est prouvée directement par un appareil appelé la machine d'Attwood, consistant essentiellement en une poulie sur laquelle passe une corde qui porte des poids égaux attachés à ses deux bouts. Une petite barre de métal est posée sur un des poids, qui se met alors à descendre en remontant l'autre; au bout d'un temps qui est mesuré, cette barre est enlevée, et dès lors, les deux côtés étant également tendus, le mouvement continue avec la vitesse qui était acquise à cet instant. La distance parcourue dans une seconde est alors mesurée et donne la vitesse; on trouve qu'elle est proportionnelle au temps pendant lequel la barre a participé à la descente.

La seconde proposition, à savoir la proportionnalité entre l'espace parcouru et le carré du nombre des secondes écoulées, est vérifiée à l'aide de la machine de Morin, laquelle consiste en un cylindre vertical qui tourne uniformément, tandis qu'un corps tombant à côté du cylindre porte un crayon qui laisse sa trace sur

celui-ci. La courbe ainsi marquée enregistre la distance dont le corps est tombé à chaque instant.

Fluxions.

Ces recherchés de Galilée ont à plus d'un égard fondé la science dynamique; mais, parmi ces points de vue, celui qui n'a pas le moins d'importance, c'est la preuve que chacune des deux manières d'énoncer la loi de la chute des corps implique l'autre. Sachant que la distance parcourue dans la chute est proportionnelle au carré du temps, montrer que la vitesse est proportionnelle au temps lui-même, c'est un cas particulier du problème. Sachant où un corps se trouve à chaque instant, trouver la vitesse qu'il possède à chaque instant, voilà le problème général dont Newton a trouvé la solution par la méthode des fluxions. Quand une quantité change avec le temps, le *taux* de son changement est appelé la *fluxion* de cette quantité. Dans le cas d'un corps qui se meut, la quantité à considérer c'est la distance parcourue par ce corps, et la fluxion de cette distance, c'est la vitesse avec laquelle le corps se déplace. La méthode de Newton résout ce problème: sachant la grandeur d'une quantité à un moment quelconque, trouver sa fluxion à un moment quelconque. Sur le Continent, et plus tard aussi en Angleterre, la méthode a été appelée calcul différentiel, parce que la différence entre deux valeurs de la quantité variable intervient dans un des procédés qui peuvent être employés pour calculer sa fluxion. Le problème inverse: sachant que la vitesse est proportionnelle au temps écoulé, trouver la distance parcourue dans la chute, est un cas particulier du problème général: sachant la vitesse qu'a un corps à chaque instant, trouver où il est à un instant quelconque; ce qui revient à: étant donnée la fluxion d'une quantité, trouver la quantité elle-même. La réponse à ce problème a été fournie par Newton au moyen de la méthode inverse des fluxions, qui est aussi nommée calcul intégral, parce que, dans un des procédés qui peuvent être suivis pour calculer la quantité cherchée, celle-ci est regardée comme un tout (*integer*) formé d'un grand nombre de petites parties. Ainsi la méthode des fluxions, autre-

ment dite le calcul différentiel et intégral, a son point de départ dans l'étude faite par Galilée du mouvement parabolique.

Mouvement harmonique. Les anciens, regardant le cercle comme la plus parfaite des figures, croyaient que le mouvement circulaire était non-seulement *simple*, c'est-à-dire ne résultant pas de la combinaison d'autres mouvements, mais encore *parfait*, en ce sens que, une fois appliqué à des corps parfaits, il se maintiendrait lui-même sans intervention extérieure. Les modernes, pour qui la perfection est seulement une chose à laquelle on peut tendre, mais qu'on n'atteint jamais dans la pratique, ont dû rejeter ces deux doctrines. La seconde, d'ailleurs, appartient à la cinétique, et sera de nouveau mentionnée sous ce chef. Mais au point de vue de la cinématique on a trouvé nécessaire d'envisager le mouvement circulaire uniforme d'un point comme composé de deux oscillations. Si nous reprenons l'exemple de l'horloge, l'extrémité de l'aiguille des minutes décrit un cercle d'un mouvement uniforme ; mais si nous considérons séparément sa position verticale et sa position horizontale, nous verrons qu'elle ne fait pas seulement une oscillation de haut en bas, mais en même temps une oscillation de côté et d'autre, l'une et l'autre dans la même période de une heure. Si nous supposons qu'un bouton se meuve verticalement dans une coulisse entre les chiffres XII. et VI. de manière à être toujours au même niveau que l'extrémité de l'aiguille des minutes, ce bouton exécutera seulement une des deux oscillations qui sont combinées dans le mouvement de cette extrémité ; et l'autre oscillation serait réalisée par un autre bouton qui serait astreint à se mouvoir semblablement entre les chiffres III. et IX. de manière à être toujours verticalement au dessus ou au dessous de l'extrémité de l'aiguille. Ces deux mouvements ont des lois identiques, mais ils sont échelonnés de telle sorte, que chacun des points mobiles est aux extrémités de sa course au moment où l'autre passe au centre du cadran. Une oscillation de cette espèce se nomme un *mouvement harmonique simple.* Ce nom est dû à sir William Thomson, et a été motivé par la connexion

intime qui existe entre un tel mouvement et la théorie des cordes vibrantes. En fait, le mouvement harmonique, simple ou composé, est la plus universelle de toutes les formes de mouvement; on en trouve des exemples non-seulement dans le mouvement de toute particule d'un solide vibrant, comme une corde de piano ou de violon, un diapason, ou la membrane d'un tambour, mais encore dans ces petites excursions des particules d'air qui transportent le son d'un endroit à un autre, dans les vagues et les marées de la mer, et dans la vibration étonnamment rapide de l'éther luminifère, qui, dans son action diverse sur différents corps, se manifeste sous forme de lumière, de chaleur rayonnante ou d'action chimique. Les mouvements harmoniques simples peuvent se différencier les uns d'avec les autres par trois circonstances: l'extension ou *amplitude* de l'oscillation, qui se mesure par la distance entre la position moyenne et les positions extrêmes; la *période* ou intervalle de temps entre deux passages consécutifs par une position extrême; enfin le temps du départ ou *époque*, qu'on exprime en disant à quel point du parcours de l'oscillation se trouve le mobile à un instant donné. Un des théorèmes les plus étonnants et les plus féconds de la science mathématique est celui-ci: c'est qu'un mouvement *périodique* quelconque, c'est-à-dire tout mouvement qui se répète à des intervalles de temps définis, est un composé de mouvements harmoniques simples dont les périodes sont des parties aliquotes, successivement de plus en plus petites, de la période originaire, et dont les amplitudes deviennent (après un certain nombre de périodes) d'autant plus petites que les périodes sont plus rapides. Les tons "harmoniques" d'une corde, que l'on entend toujours avec le son fondamental, sont un cas particulier de ces mouvements constituants. Ce théorème a été énoncé par Fourier relativement à la propagation de la chaleur, mais ses applications sont innombrables et s'étendent sur tout le domaine de la science physique.

Les lois de la combinaison des mouvements harmoniques ont été démontrées par quelques ingénieux appareils de MM. Tisley

et Spiller et par une machine inventée par M. Donkin; mais l'application la plus importante s'en trouve dans l'horloge des marées due à sir W. Thomson, et dans une machine plus perfectionnée qui trace des courbes à l'aide desquelles la hauteur de la marée dans un port donné, à toute heure du jour et de la nuit, peut être prédite avec autant d'exactitude qu'on en pourrait attendre d'une observation directe. Une combinaison particulière mérite d'être mentionnée: l'union d'une vibration verticale avec une vibration horizontale de période moitié moindre donne naissance à cette figure du chiffre 8 que M. Marey a observée dans ses belles recherches sur le mouvement de la pointe de l'aile d'un oiseau ou d'un insecte.

Mouvement elliptique.

Le mouvement du soleil et de la lune relativement à la terre a été d'abord expliqué par une combinaison de mouvements circulaires; ce fut l'immortelle conquête des astronomes grecs Hipparque et Ptolémée. Réellement, en tant que ces mouvements sont périodiques, il résulte du théorème de Fourier mentionné plus haut, que ce mode d'explication est mathématiquement suffisant pour les représenter; et les tables astronomiques ont été calculées jusqu'à ce jour par une méthode qui pratiquement revient au même. Mais cette représentation n'est pas la plus simple qu'on puisse trouver; elle requiert en théorie un nombre infini de mouvements composés et ne nous apprend rien sur la manière dont ils sont liés les uns aux autres. Nous devons à Kepler la description exacte et complète du mouvement planétaire ou elliptique. Ses recherches s'appliquèrent d'abord à l'orbite de la planète Mars autour du soleil, mais les résultats obtenus se trouvèrent vrais pour les orbites de toutes les planètes autour du soleil et pour celle de la lune autour de la terre. La trajectoire du mobile dans chacun de ces mouvements est une ellipse, ou ombre ovale d'un cercle, courbe qui jouit relativement à deux points intérieurs, appelés foyers, de propriétés qui font jouer à ceux-ci pour ainsi dire le rôle du centre unique du cercle. Dans le cas de l'ellipse décrite par une planète, le

soleil est situé à un des foyers ; dans le cas de la lune la terre occupe également un foyer. Voilà pour la description géométrique du mouvement. Kepler observa de plus que la ligne tirée du soleil à la planète ou de la terre à la lune, si on la suppose suivre le corps dans son mouvement, décrit des aires égales dans des temps égaux. Ces deux lois, appelées première et deuxième lois de Kepler, constituent la description cinématique du mouvement elliptique ; mais pour obtenir des formules propres au calcul, il était necéssaire de déduire de ces lois les divers composants harmoniques du mouvement, suivant la ligne dirigée vers le soleil, et perpendiculairement à cette ligne ; ce calcul a beaucoup occupé l'attention des mathématiciens.

Les lois du mouvement rotatoire des corps rigides sont un peu difficiles à exposer sans l'aide de symboles mathématiques, mais elles sont parfaitement connues. Des exemples en sont fournis par l'appareil appelé gyroscope et par le mouvement de la terre ; l'application faite par Foucault, du mouvement de l'un, pour expliquer la nature de l'autre, est une des plus belles expériences qui appartiennent entièrement à la dynamique.

Rotation.

Après la *translation* d'un corps rigide, viennent en rang de simplicité deux espèces de mouvements qui à première vue paraissent très-différentes, mais entre lesquelles une observation plus serrée découvre de frappantes analogies. Ce sont le mouvement de rotation autour d'un point fixe et le mouvement de glissement sur un plan fixe. Le premier est très-facilement réalisé en pratique par l'articulation bien connue sous le nom de genouillère, consistant en un corps terminé par une portion de surface sphérique, qui peut tourner dans une cavité sphérique de même dimension. Le centre de la surface sphérique est alors un point fixe, et le mouvement est réduit au glissement d'une sphère dans l'intérieur d'une autre. De la même manière si nous considérons, par exemple, le mouvement d'un fer plat dans un laminoir, nous voyons que ce n'est pas une pure translation, car le fer est fréquemment enroulé à mesure qu'il avance ; mais le

mouvement peut être décrit comme étant le glissement d'un plan sur un autre. Ainsi dans chaque cas l'objet à étudier se trouve être le glissement d'une surface sur une autre qui s'y adapte exactement. Car lorsque deux surfaces s'appliquent exactement l'une sur l'autre dans toutes leurs positions, elles ne peuvent être que des sphères de même rayon ou des plans ; et le second cas est réellement compris dans le premier, car un plan peut être regardé comme une sphère de rayon infini. Ainsi, quand on fait glisser un morceau de glace sur la surface parfaitement unie d'un étang gelé, il tourne réellement autour d'un point fixe qui est le centre de la terre ; car la surface gelée peut être regardée comme une portion d'une immense sphère ayant ce point pour centre. Mais ce mouvement ne peut pas être pratiquement distingué d'avec celui du glissement sur un plan.

Dans ce dernier cas, on trouve que, sauf dans la pure translation, il y a à chaque instant un certain point qui est en repos, et autour duquel le corps tourne comme autour d'un centre. Ce point est appelé le centre instantané de rotation ; il se déplace au fur et à mesure du mouvement, mais à chaque instant sa position est parfaitement définie. De ce fait résulte une conséquence très-importante, c'est que tout mouvement possible d'un plan glissant sur un autre plan peut être produit par le *roulement* d'une courbe appartenant au premier sur une courbe appartenant au second. Le point de contact des deux courbes à un instant quelconque est précisément le centre instantané de rotation à cet instant. Les problèmes à considérer dans ce sujet sont ainsi de deux sortes : étant données les courbes de roulement, trouver la trajectoire décrite par un point quelconque du plan mobile ; et : étant données les trajectoires de *deux* points du plan mobile (ce qui suffit pour déterminer le mouvement), trouver les courbes de roulement et les trajectoires des autres points. Un cas important du premier problème est celui où un cercle roule sur un autre soit intérieurement, soit extérieurement ; les courbes décrites par les points du plan mobile servent de profils pour les dents des roues. Au second

problème appartient l'utile théorie de l'articulation, qui prend maintenant une extension rapide, et qui, née de l'admirable découverte d'un mouvement exactement parallèle faite par M. Peaucellier, a reçu entre les mains du professeur Sylvester, de M. Hart et de M. A. B. Kempe, un développement immense et tout à fait inattendu.

Si nous passons maintenant à la forme sphérique de ce mouvement, nous trouvons que le centre instantané de rotation (auquel on peut évidemment substituer un axe instantané perpendiculaire au plan) est remplacé par un axe instantané passant par le centre commun des sphères mobiles. De même le roulement d'une courbe sur une autre dans le plan est remplacé par le roulement d'un *cône* sur un autre, ces deux cônes ayant ce même centre pour sommet commun.

Des théorèmes analogues ont été établis pour le mouvement le plus général d'un corps rigide. M. Chasles a montré qu'il est toujours semblable au mouvement d'un tire-bouchon pénétrant dans un bouchon ; c'est-à-dire qu'il consiste toujours en une rotation autour d'un certain axe instantané, combinée avec une translation parallèlement à cet axe. L'hélice qui est ainsi décrite à chaque instant se déplace au fur et à mesure du mouvement, mais, à un instant donné, elle est parfaitement définie par sa situation et par son pas. De plus tout mouvement d'un corps rigide peut être produit par le roulement et le glissement d'une surface sur une autre, ces deux surfaces étant engendrées par le mouvement de lignes droites. Ce théorème, qui couronne la géométrie du mouvement, est dû au professeur Cayley. Les lois de la combinaison des mouvements hélicoïdaux ont été étudiées par le Dr. Ball.

Ainsi, en marchant graduellement du plus simple au plus composé, nous avons pu analyser tous les changements qui s'opèrent dans la situation d'un corps. Il ne nous reste plus qu'à analyser les changements de dimension et de forme. Il y en a trois espèces, qui sont toutes comprises sous le nom commun de

déformation. Nous pouvons d'abord avoir un changement de dimensions sans changement de forme, c'est-à-dire une dilatation ou une contraction uniforme d'un corps tout entier dans toutes les directions, comme cela arrive à une sphère de métal qui est chauffée ou refroidie. Ensuite nous pouvons avoir un allongement ou un raccourcissement dans une direction seulement, toutes les lignes qu'on peut tracer à l'intérieur du corps parallèlement à cette direction étant allongées ou raccourcies dans un même rapport ; c'est ce qui arriverait à une tige ayant six pieds de long et un pouce carré de section, si on l'étirait de manière à lui donner sept pieds de long, sa section restant d'un pouce carré. En troisième lieu nous pouvons avoir un changement de forme produit par le glissement des couches les unes sur les autres ; ce genre de modification qu'on opère facilement sur un paquet de cartes est appelé *cisaillement*. Par des combinaisons appropriées de ces trois sortes d'actions, tout changement quelconque de dimension et de forme peut être produit ; ou bien nous pouvons laisser de côté le second mode d'action et réaliser une modification quelconque, en combinant une dilatation ou une contraction avec deux cisaillements.

Dynamique. Nous avons déjà dit que le changement du mouvement d'un corps dépend de la position et de l'état des corps environnants. Il est nécessaire, pour rendre cela intelligible, de signaler une certaine propriété des trois espèces de mouvement d'un point, que nous avons décrites.

On peut se rendre compte de la combinaison des vitesses en envisageant le cas d'un corps transporté sur un véhicule quelconque dans l'intérieur duquel il se déplacerait. La vitesse effective du corps se compose alors de la vitesse du véhicule et de la vitesse du corps relativement au véhicule. Par exemple, lorsqu'un homme se promène dans un wagon de chemin de fer, sa vitesse effective se compose de la vitesse du wagon et de la vitesse avec laquelle il se promène.

Quand la vitesse d'un corps est changée par l'intervention

d'une vitesse dont la direction est, ou identique, ou directement opposée, sa grandeur seule est modifiée ; mais quand la vitesse intervenante est transversale, il se produit encore un changement de direction. Ainsi, lorsqu'un homme se promène en long sur un navire, il ne fait que voyager un peu plus ou un peu moins vite ; mais s'il se promène transversalement d'un côté du navire à l'autre, il modifie légèrement la direction de son mouvement réel.

Cela dit, dans le mouvement parabolique d'un projectile nous trouvons que, tandis que la vitesse horizontale demeure invariable, la vitesse verticale s'accroît uniformément. Le projectile possède une vitesse descendante qui est, pour ainsi dire, continuellement versée en lui. Ce changement graduel de vitesse se nomme *accélération :* nous pouvons donc dire que l'accélération d'un projectile demeure toujours la même et est dirigée verticalement de haut en bas.

Dans un mouvement harmonique simple, l'accélération est dirigée vers le centre et elle est toujours proportionnelle à la distance entre le centre et le mobile. Dans le cas du mouvement elliptique, Newton a prouvé que l'accélération est dirigée vers le foyer et qu'elle est inversément proportionnelle au carré de la distance entre le mobile et le foyer.

Considérons maintenant les circonstances qui président à ces mouvements. Pour produire un mouvement harmonique simple, prenons un morceau de corde élastique dont la longueur soit égale à la hauteur d'une table bien unie, puis attachons un bout de la corde à une balle et l'autre bout au plancher, après l'avoir fait passer par un trou pratiqué dans la table, de manière à ce que la balle repose exactement sur le bord supérieur du trou lorsque la corde est sans tension. Si nous écartons la balle du trou de façon à tendre la corde, et qu'ensuite nous la lâchions, elle oscillera de part et d'autre du trou en étant animée d'un mouvement harmonique simple. L'accélération (c'est-à-dire le taux du changement de vitesse) est ici proportionnelle à la distance de la balle au trou, c'est-à-dire à *la quantité dont la corde est allongée.* Elle est dirigée

vers le trou, c'est-à-dire dans la direction de l'allongement. Dans le cas de la lune tournant autour de la terre, l'accélération est dirigée vers la terre, et elle est inversément proportionnelle au carré de la distance entre la terre et la lune.

Ainsi dans ces deux cas le changement de vitesse dépend des circonstances extérieures ; mais dans le cas de la balle cette circonstance c'est la déformation éprouvée par un corps contigu, à savoir la corde élastique ; tandis que dans le cas de la lune, cette circonstance c'est la position d'un corps éloigné, à savoir la terre. Le mouvement d'un projectile peut être assimilé à celui de la lune, dont il ne serait qu'un cas spécial ; car la parabole, que le projectile décrit, peut être regardée comme l'extrémité d'une très-longue ellipse, dont l'autre extrémité passerait autour du centre de la terre.

Il existe entre les deux cas une différence remarquable. L'oscillation de la balle dépend de sa grandeur : une grosse balle oscillera plus lentement qu'une petite. Ceci nous conduit à modifier la règle. Si une grosse balle est équivalente à deux petites, quand elle marche avec la même vitesse, elle doit contenir deux fois autant de mouvement que l'une des petites ; ou bien, comme on dit maintenant, avec la même vitesse elle possède un *moment* double. Or la variation de moment se trouve être la même pour toutes les balles lorsque le moment est compté comme proportionnel à la quantité de matière contenue dans la balle aussi bien qu'à la vitesse de celle-ci. La quantité de matière contenue dans un corps se nomme la *masse* de ce corps ; s'il s'agit de corps formés de la même substance elle est simplement, comme on le comprend, la quantité de cette substance ; mais s'il s'agit de corps de différentes substances, on la calcule de manière à ce que la règle ci-dessus soit vérifiée. On peut énoncer comme suit la règle pour ce cas-là : la variation du moment d'un corps (c'est-à-dire du produit de sa vitesse par sa masse) dépend de l'état de déformation des corps contigus. Au point de vue de cette dépendance, cette variation de moment est nommée la *pression* ou la *tension* du corps.

contigu suivant la nature de la déformation ; ces deux désignations sont comprises sous le nom commun d'*effort*, dont l'équivalent anglais est le mot *stress* introduit par Rankine.

Mais dans le cas des projectiles, on trouve que l'accélération est la même pour tous les corps dans le même lieu ; et cette règle se vérifie dans tous les cas de mouvement planétaire. Il semblerait donc que c'est la variation de vitesse et non pas la variation de moment qui dépend de la situation de corps éloignés. Mais ce cas est ramené sous la même règle que l'autre, si l'on suppose que la masse du corps mobile doit être comptée parmi les "circonstances" dont le mouvement dépend. La variation de moment est dans ce cas nommée l'attraction de gravitation, et nous disons que l'attraction est proportionnelle à la masse du corps attiré. Cette manière de représenter les faits est confirmée par les attractions et les répulsions électriques et magnétiques, dans lesquelles la variation de moment dépend de la situation et de l'état de l'objet attirant, et de la charge électrique ou du magnétisme induit de l'objet attiré.

Il y a ainsi deux espèces de forces : l'effort résultant de la déformation d'un corps contigu, et l'attraction ou la répulsion exercée par un corps éloigné. On a essayé avec plus ou moins de succès d'expliquer chacune de ces espèces de force au moyen de l'autre. Dans le langage ordinaire le mot " force " signifie un effort musculaire exercé par le corps humain. Dans ce cas la partie du corps humain qui est en contact avec l'objet à remuer est dans un état de déformation, et la force considérée au point de vue dynamique est de la première sorte. Mais cet état est précédé et suivi de décharges nerveuses, qui sont accompagnées de sensations d'effort et de déformation musculaire, complication de circonstances qui ne se présente pas dans l'action des corps inanimés. Ce qui est commun aux deux cas, c'est que la variation du moment dépend de la déformation.

Ayant ainsi expliqué la loi de la force, qui est le fondement de la dynamique, nous pouvons considérer le reste des lois du mouve-

ment. Il est commode de les énoncer d'abord pour des particules, c'est-à-dire pour des corps si petits qu'on n'a à se préoccuper que de leur situation. Alors si on envisage une particule spéciale, chacune des autres particules, soit adjacentes, soit éloignées, exercera sur elle, en vertu de sa situation et de son état, une action élémentaire qui s'exprimera par une certaine valeur de la variation de moment; et si on combine ces valeurs d'après la loi de composition des vitesses, le résultat sera la variation effective du moment de la particule qu'on envisage. Cet énoncé, et celui de la loi de la force mentionnée plus haut, équivalent ensemble à la première et à la deuxième loi du mouvement données par Newton. Sa troisième loi est que la variation de moment qu'une particule éprouve, en raison de la situation et de l'état d'une autre particule, est égale et opposée à la variation de moment que celle-ci éprouve par suite de la situation et de l'état de la première.

A l'aide de ces lois d'Alembert a montré comment on peut traiter le mouvement des corps rigides ou des systèmes de points matériels. Il résulte de sa méthode que deux efforts appliqués à un corps rigide sont équivalents, dans leur effet sur le corps dans son ensemble, à un effort unique dont la direction et la situation sont tout à fait indépendantes de la nature et de la forme du corps dont il s'agit. La loi suivant laquelle se composent les efforts qui agissent sur un système de particules est, en fait, identique à la loi de la composition des vitesses, en tant qu'il s'agit du mouvement du système considéré comme un tout. Ce résultat remarquable, mais un peu compliqué, de la dynamique a été admis dans quelques manuels, sous le nom de parallélogramme des forces, comme un principe indépendant sur lequel on a assis la statique; singulière interversion de l'ordre historique des idées aussi bien que de la méthode adoptée par les grands géomètres.

Quand le résultat de toutes les circonstances dont un corps dépend est tel, qu'il n'y ait aucun changement de son moment, on dit que le corps est en équilibre. Dans ce cas, si le corps est en repos, il y reste, et c'est pour cela que l'étude de ces conditions

se nomme statique. En traitant la statique des corps rigides, on a à examiner seulement les cas, où la résultante des efforts et des attractions externes, agissant sur le corps considéré, se réduit à zéro. Mais la partie de beaucoup la plus importante de la statique, a pour objet de déterminer les efforts qui s'exercent dans l'intérieur des corps entre leurs parties contiguës. Pour les corps qui ne sont ni cristallins ni fibreux, mais dont les propriétés sont les mêmes dans toutes les directions, il suffit de la connaissance de deux quantités pour déterminer dans tous les cas l'effort résultant d'une déformation donnée. Ce sont l'élasticité de volume, ou résistance au changement de dimension, et l'élasticité de forme appelée aussi rigidité, ou résistance au changement de forme. Les problèmes relatifs à l'état intérieur des corps sont bien plus difficiles que ceux dans lesquels on les traite comme rigides. Ainsi, lorsqu'une poutre est appuyée par ses deux extrémités, il est très-facile de calculer la partie de son poids que chaque appui supporte, mais la détermination de l'état de tension dans son intérieur est un problème d'une grande complication.

Il y a un théorème de cinétique qui doit être mentionné ici. Si l'on multiplie le demi-moment de chaque particule d'un corps, et qu'on fasse la somme de tous les résultats ainsi obtenus, on formera une quantité, qu'on nomme l'énergie cinétique du corps envisagé. D'un autre côté, lorsque celui-ci passe d'une position à une autre, si l'on multiplie chaque force qui agit sur lui, que ce soit une attraction ou un effort, par la distance parcourue suivant la direction opposée à cette force, et que l'on ajoute les produits, on obtiendra ce qu'on nomme le travail accompli pour surmonter les forces durant le déplacement dont il s'agit. Il ne dépend pas du tout de la vitesse avec laquelle le déplacement s'opère, mais seulement des positions entre lesquelles il s'opère. Si un corps, en se mouvant, perd de l'énergie cinétique, il accomplit une quantité de travail égale à cette perte. Si au contraire il gagne de l'énergie cinétique, une quantité de travail égale à ce gain devra être accomplie, pour ramener le corps de sa position finale à

sa position initiale. La grandeur du travail qui devrait être accomplie, pour amener un corps d'une certaine position déterminée à sa position actuelle, se nomme l'énergie potentielle de ce corps. Le théorème ci-dessus peut alors être énoncé ainsi : la somme des énergies potentielle et cinétique d'un corps est toujours la même, pourvu que les circonstances qui agissent sur lui ne changent pas. Aussi ce théorème est appelé la conservation de l'énergie. C'est une des nombreuses conséquences qu'on peut tirer des équations du mouvement : elle ne suffit pas pour déterminer le mouvement, mais elle est extrêmement utile pour en donner les résultats généraux, dans les cas où la recherche de toutes ses particularités serait difficile ou sans avantage ; elle s'applique spécialement aux machines, puisqu'à l'égard de celles-ci la question importante est de connaître le travail qu'elles peuvent accomplir.

On a pu voir par ce qui précède, que la science du mouvement dépend d'un petit nombre de principes fondamentaux, faciles à vérifier, et qu'elle consiste presque entièrement dans des déductions mathématiques et des calculs basés sur ces principes. On ne peut donc pas l'appeler une science expérimentale, au même titre que d'autres sciences, où l'on en est encore à découvrir des faits d'un caractère fondamental. Les appareils qui s'y rapportent peuvent être commodément classés sous trois chefs :

(*a*) Appareils servant à expliquer les théorèmes, ou à résoudre les problèmes de la cinématique, tels que ceux qui ont été mentionnés plus haut pour les mouvements harmoniques composants. Il y a lieu d'espérer une grande extension dans ce que nous pourrons réaliser à cet égard.

(*b*) Appareils servant à mesurer les quantités dynamiques, telles que les poids, le travail mécanique, les élasticités des différentes substances. Il est traité plus complétement de la classification de ces appareils dans le chapitre MESURES.

(*c*) Appareils construits pour des buts appartenant à d'autres sciences, mais servant à expliquer par leurs dispositions et leurs fonctions les résultats de la cinématique ou de la dynamique. Tout le reste de la collection est compris dans cette classe.

W. K. CLIFFORD.

PHYSIQUE MOLÉCULAIRE.

I.—Considérations générales.

Dans l'état actuel des sciences exactes, fondées sur les données de l'expérience, celles des propriétés de la matière, qui ne se rapportent pas à la vie, peuvent, d'une manière générale, se classer en propriétés (1) chimiques, (2) physiques, et (3) moléculaires.

(1.) La similitude des corps qui constituent la terre résulte de ce que leurs éléments se combinent en proportions définies. La stabilité des corps résulte de ce que ces proportions sont toujours les mêmes, dans les mêmes circonstances, et de ce que, le plus souvent, elles ne varient pas, alors que ces circonstances éprouvent de grands changements. C'est la radiation, agissant directement ou par l'intermédiaire de la vie qu'elle engendre, qui est le principal agent capable de troubler l'équilibre, par lui-même stable, des forces chimiques.

(2.) La faculté qu'ont les substances de devenir les véhicules ou les demeures temporaires des forces physiques peut être considérée comme la cause des attributs physiques de la matière, au sens le plus limité de ce terme. Ces attributs se manifestent par la transmission de la pression dans les machines, la production du mouvement vibratoire, l'excitation électrique ou magnétique, l'absorption et la propagation de la radiation, enfin, le fait que la matière devient pesante dès que deux masses sont rapprochées. Les corps que l'on considère sont pondérables. Les forces agissent ou peuvent agir entre des corps qui ne se trouvent pas en contact immédiat. On rapporte chaque état

ou changement d'état des corps à l'action des forces physiques, en sorte que celles-ci ne sauraient être ni plus ni moins nombreuses que les catégories de changements que les corps peuvent éprouver. La tendance actuelle de la science est de considérer toutes les diverses forces physiques comme de simples variétés de la force mécanique, et comme ne différant entre elles que sous le rapport de leur mode d'application ou par leurs effets sur les corps. Ainsi un coup de bâton, le choc d'une onde sonore, l'attraction d'un aimant, la pression d'un gaz dilaté par la chaleur sont autant de forces mécaniques, et, par suite, on soutient, non sans raison, que la force mécanique doit être en activité dans l'espace interposé entre un corps agissant et celui qui éprouve l'action du premier. De là cette conception générale, que la force qui unit entre elles les diverses parties d'un corps tel, par exemple, qu'un barreau d'acier, doit être attribuée à la même cause que la force qui produit la chute de ce barreau, lorsqu'il tombe vers le sol, ou que celle qui le pousse vers l'aimant, ou même encore que celle en vertu de laquelle il se rouille dans l'air humide.

Le fait que les combinaisons chimiques ont lieu suivant des proportions constantes, tant que les circonstances restent les mêmes, a donné naissance à la conception moderne des atomes considérés comme masses élémentaires indivisibles, probablement sphériques, mais invisibles à cause de leur extrême petitesse. On a été conduit à admettre que tous les atomes constituant un même corps simple ont le même poids, tandis que les atomes de corps simples différents ont des poids inégaux, et que, par suite, les proportions suivant lesquelles les combinaisons chimiques ont lieu, sont en raison composée du poids et du nombre relatif des atomes. D'après la théorie atomique, l'uniformité de composition du corps que nous appelons l'eau, par exemple, dont chaque masse du poids de 9 livres renferme toujours une livre d'hydrogène pour huit d'oxygène, dépend (*a*) du fait, qu'au moment de la formation de l'eau, chaque atome d'hydrogène s'unit à un atome d'oxygène, et aussi (*b*) de ce que chaque atome d'oxygène

pèse huit fois autant que chaque atome d'hydrogène. Tout groupe d'atomes ainsi formé s'appelle une molécule, et il est généralement admis que ces molécules peuvent, à leur tour, sans éprouver aucun changement interne, se combiner avec d'autres atomes ou d'autres molécules.

Quelques auteurs ont soutenu que les atomes eux-mêmes ne sont jamais libres et qu'ils sont toujours groupés ensemble ou combinés en molécules. Suivant cette manière de voir, toute combinaison chimique est envisagée comme le résultat d'une double décomposition des molécules élémentaires.

En outre, on admet que les combinaisons atomiques, dans un seul et même élément, peuvent varier de diverses manières suivant les circonstances, et que, en particulier, les variations de l'intensité calorifique que l'on considère comme le résultat de commotions intermoléculaires, ont la faculté de déterminer les arrangements numériques des atomes constituant les molécules. Cette théorie a été proposée pour rendre compte du fait, que le degré de réfrangibilité de la lumière absorbée par la vapeur de chaque élément, dépend de sa température, ainsi que pour justifier l'opinion d'après laquelle la stratification de la chromosphère du soleil ne s'accorde pas avec l'ordre relatif des densités des corps simples, en supposant que la dilatation de leurs vapeurs suive la loi ordinaire. L'allotropisme, si fréquent parmi les corps non-métalliques, montre d'ailleurs que ce genre d'aggrégation moléculaire peut être très-permanent une fois qu'il a pris naissance.

Après que la théorie atomique eut été adoptée dans le but de rendre compte des phénomènes chimiques, elle servit, sous une forme plus générale, à expliquer l'action d'autres forces. Le fait qu'une même dépense de travail employé à vaincre le frottement, fournit toujours une même quantité de chaleur, et la remarque qu'il faut fournir plus de chaleur à un même volume de gaz pour élever sa température d'une même quantité, lorsque ce gaz se dilate en refoulant l'atmosphère, que lorsqu'il est confiné entre des parois résistantes, conduisirent à la notion d'après laquelle la

chaleur n'est autre chose que le choc produit par le mouvement d'un atome ou d'une molécule, et que l'intensité de ce choc dépend à la fois de la masse et de la vitesse de cet atome ou de cette molécule. Lorsqu'il s'agit de tension calorifique ou de température, la vitesse seule est à considérer; mais il faut y joindre l'idée de masse dès que l'on envisage les quantités de chaleur. Dans cette théorie la force élastique de l'air représente la somme des chocs atomiques ou moléculaires qu'éprouve le récipient qui le contient. En outre on considère la propagation de la chaleur par conductibilité comme résultant de l'impulsion que les atomes ou molécules du corps le plus chaud, animés du mouvement le plus rapide, communiquent aux atomes ou aux molécules du corps le moins chaud, se mouvant plus lentement. La rapidité de ce mouvement moléculaire se déduit de la vitesse d'écoulement d'un gaz, à son entrée dans un espace vide. La vitesse de diffusion de deux gaz mesure le degré de fréquence des chocs moléculaires. C'est en partant de ces considérations que l'on a essayé de déterminer approximativement les dimensions des atomes.

On admet généralement que le milieu hypothétique, qui a reçu le nom d'éther, est répandu d'une manière continue dans l'espace ainsi que dans la matière elle-même, ou au moins dans les vides intermoléculaires. Impondérable au sens habituel de ce terme, l'éther, s'il est continu, doit être élastique et capable de transmettre l'énorme force mécanique qui résulte de la radiation stellaire. Si, par contre, l'élasticité d'une substance continue est inadmissible, alors l'éther lui-même doit être formé d'atomes et transmettre la force par ses propres chocs atomiques. Dans cette hypothèse, on pourrait attribuer à des chocs de cette nature l'impulsion, que l'on a cru pouvoir être communiquée à la matière, par la radiation agissant au travers du vide artificiel le plus parfait.

(3.) Occupant une place en quelque sorte intermédiaire entre les phénomènes chimiques énergiques, tranchés, variables dans leurs caractères, et ceux qui résultent de la chaleur, de la lumière et de l'électricité, d'innombrables phénomènes, encore imparfaite-

ment classés, constituent plus spécialement la physique moléculaire; telles sont les conditions de la structure ou de la texture des corps, la cohésion et l'adhésion, les mélanges, et les phases du mouvement intermoléculaire.

L'hypothèse atomique une fois acceptée, on a bien vite tenté de rattacher les formes extérieures des cristaux aux conditions d'équilibre de leurs atomes et de leurs molécules. La doctrine de l'isomorphisme a montré quels sont les corps simples ou composés, qui peuvent se remplacer les uns les autres sans affecter le caractère géométrique des formes cristallines. La conception du mouvement atomique interne paraît cependant avoir détourné momentanément les esprits de cette voie, en attendant sans doute que l'on ait découvert les lois des trajectoires polygonales des atomes. L'étude des corps solides, par opposition aux liquides, ainsi que celle de ces derniers par opposition aux corps gazeux, a été abandonnée depuis la découverte de la continuité qui existe entre les liquides et leurs vapeurs sous une forte pression, et depuis que l'on connaît les variations de la température de solidification des liquides comprimés. La continuité entre les soi-disant trois formes distinctes de la matière, c'est-à-dire, entre les états liquide, solide et gazeux, se déduit, soit de ce que les liquides sont doués de cohésion aussi bien que les solides, soit de ce que les gaz ont, comme les liquides, une certaine viscosité, soit enfin de ce que, sous ces trois états, les corps possèdent tous l'élasticité de volume. La cohésion des corps solides se mesure directement par leur résistance à la rupture. Celle des liquides peut se déterminer, ou bien de la même façon, par la considération du volume de leurs gouttes, à l'instant de leur chute, ou indirectement, par l'emploi d'un tube capillaire, c'est-à-dire en opposant à la fois la pesanteur et la cohésion des liquides à leur adhésion pour un corps solide. La viscosité des liquides et des gaz, en d'autres termes la résistance qu'ils opposent au déplacement de leurs molécules, se manifeste par la résistance qu'ils opposent au mouvement des corps solides dans leur intérieur. Dans le cas

des liquides, cet effet se complique encore de leur adhésion avec les solides. La viscosité influe aussi sur la transpiration des gaz au travers de tubes étroits, ainsi que sur l'écoulement des liquides dans les mêmes circonstances, ce qui fournit un autre moyen de mesurer cette viscosité.

Indépendamment de toute hypothèse sur l'agitation calorifique des molécules, le mouvement intermoléculaire, dans un même fluide, se manifeste par les ondes sonores et par la propagation des variations de densité. Chaque molécule se déplace alors suivant une ligne droite passant par l'origine de l'ébranlement. Les seuls éléments variables dans ces sortes de mouvements moléculaires paraissent être : 1° la longueur d'onde, c'est-à-dire la distance entre deux points où la phase est simultanément la même ; 2° l'amplitude de l'onde, soit la longueur totale des excursions de chaque molécule ; et 3° probablement aussi la qualité de l'onde, c'est-à-dire la loi suivant laquelle la densité du fluide varie entre deux points homologues successifs. Comme toutes les ondes sonores, quelles que soient leurs amplitudes, se propagent à peu près avec la même vitesse, leur longueur peut se mesurer par le degré de fréquence de leur passage en un même point, situé à une distance constante de la source, en d'autres termes par la hauteur du son perçu par l'oreille. En même temps l'intensité de ce son détermine l'amplitude des ondes qui le produisent. La densité totale d'une masse d'air, recevant ou transmettant des ondes sonores, est moindre que celle de la même masse en repos, d'où il résulte que les corps qui obstruent le passage d'un système d'ondes, ont une tendance à se rapprocher de la source du son.

Les vagues, dans les liquides, résultent de mouvements moléculaires plus variés et plus compliqués. Lorsqu'il n'existe pas d'obstacle, le déplacement vertical de chaque portion de la surface du liquide se propage sous forme de dépressions et de saillies annulaires. Mais ici la vague résulte de la sommation des déplacements des diverses molécules qui décrivent des orbites,

dont les plans sont parallèles à la direction de propagation. L'amplitude et la longueur d'onde influent l'une et l'autre sur la rapidité du mouvement oscillatoire, qui dépend directement de la longueur et indirectement de l'amplitude des ondes, parce que, dans un liquide indéfini, l'amplitude est, en partie, convertible en longueur. Dans des espaces limités, les ondes réfléchies peuvent rencontrer celles qui avancent, de telle sorte qu'il en résulte des nœuds et des vagues stationnaires, dont la longueur d'onde est constante. Quelle que soit l'amplitude de ces vagues stationnaires, leur durée d'oscillation reste la même, et leur vitesse de propagation varie comme la racine carrée de la longueur d'onde. Dans un vase circulaire il s'établit un seul anneau nodal, et la durée d'oscillation des vagues stationnaires est la même que celle d'un pendule dont la longueur serait égale au rayon du vase.

En ce qui concerne les mouvements intermoléculaires produits entre des corps ou des mélanges différents, on peut, pour faciliter la classification des phénomènes, considérer la matière sous ses trois états principaux : solide, liquide et gazeux. Entre les corps solides le mouvement moléculaire se manifeste, par exemple, pendant la cémentation soit carburation du fer, qui consiste en ce que l'un des deux corps pénètre dans l'autre sans qu'aucun d'eux ne soit liquéfié. A la vérité, il est possible que cette carburation se produise graduellement en se propageant du carbone au fer, de telle sorte que chaque molécule intermédiaire reçoive d'un côté du carbone, pour le céder à la molécule qui la suit de l'autre côté. Toutefois la minéralogie fournit beaucoup d'exemples indubitables de la pénétration d'un solide par un autre, sans fusion ni solution. La véritable pénétration d'un solide par un liquide n'est pas rare non plus, par exemple dans le cas de l'absorption de l'eau par la gélatine, phénomène qu'il ne faut pas confondre avec l'absorption d'un liquide par un corps poreux, ce qui est un cas de la capillarité. L'envahissement d'un solide par une vapeur ou par un gaz constitue l'occlusion. Ce phénomène consiste en ce que le fer, le palladium et d'autres métaux

absorbent plusieurs fois leur volume d'hydrogène. L'absorption de l'oxygène par l'argent métallique est probablement un cas d'occlusion, bien que l'oxygène ainsi absorbé s'échappe du métal lorsque celui-ci se refroidit et se solidifie, tandis que l'hydrogène occlus par un métal est chassé par la chaleur. La formation de l'amalgame d'ammonium rentre à peine dans les phénomènes de cet ordre, car le métal perd dans ce cas son aspect métallique, et son volume augmente considérablement à mesure qu'il se sature d'hydro-ammoniaque.

La dissolution d'un solide dans un liquide résulte de ce que la cohésion du solide est vaincue, d'abord par l'adhésion du liquide, puis par celle de la solution qui se produit.

Tandis que le mélange des gaz et des vapeurs peut toujours avoir lieu en toutes proportions, celui des liquides s'effectue tantôt en toutes proportions, tantôt en proportions définies; une quantité *n* d'un liquide *A* ne pouvant, par exemple, dissoudre plus d'une quantité *m* d'un corps *B*. La même restriction s'applique toujours à la dissolution des solides dans les liquides. Ce degré de solubilité ne peut pas encore se déduire directement de la composition élémentaire des corps, mais on peut dire, d'une manière générale, que ceux dont la composition élémentaire est la plus semblable, sont aussi ceux qui se mêlent entre eux le plus abondamment. Un liquide riche en carbone, par exemple, dissoudra un grand nombre de corps solides renfermant du carbone dans leur composition. Ainsi les alcools solubles dans l'eau sont précisément ceux dont la composition est le plus analogue à celle de ce liquide. La chaleur augmente toujours la solubilité des solides dans les liquides, excepté lorsqu'elle provoque la formation d'un nouveau corps moins soluble.

La solubilité d'un sel cristallisé dans l'eau se continue au-dessous du point de congélation. Par conséquent, si on laisse se refroidir une solution qui a été saturée au-dessus du point de solidification, le sel, ou un hydrate de ce sel, se séparera en quantité de plus en plus grande, jusqu'à ce que l'eau ait atteint une certaine tem-

pérature, inférieure à son point de congélation ; à ce moment le sel et l'eau se solidifieront à une température constante et en proportion définie. Cette température est la même que celle qui résulte de l'emploi du même sel avec la glace comme mélange réfrigérant, et le rapport entre le sel et l'eau, dans le composé solide ainsi produit, est le même que dans la partie liquide de ce mélange réfrigérant. Par contre, lorsque l'on refroidit une solution très-peu concentrée, la glace se sépare seule, et elle continue à se séparer jusqu'à ce que la température en s'abaissant soit redevenue ce qu'elle était primitivement ; à ce moment le sel et l'eau se solidifient de nouveau ensemble. A ce point de vue l'eau, amenée à son point de congélation, peut être considérée comme une solution saturée de glace. De l'eau à son maximum de densité est encore simplement de l'eau ; mais à des températures intermédiaires entre celle de son maximum et son point de congélation, elle représente une solution de glace dans l'eau, ce qui peut expliquer sa moindre densité.

Bien que la quantité d'un cristal qui peut être tenue en solution dans l'eau augmente avec la température, il arrive souvent qu'aucune solidification ne se produit pendant le refroidissement de la solution, à moins que celle-ci ne contienne quelque nucleus ou quelque fragment de matière étrangère, servant de point de départ pour la solidification. La solution est alors sur-saturée, et cette sur-saturation peut avoir lieu simultanément pour deux ou un plus grand nombre des sels dissous.

La diffusion automatique graduelle d'un sel dans l'eau qui lui est superposée, peut être envisagée, ou bien comme un acheminement des molécules du sel au travers de la solution jusqu'à l'eau superposée, ou bien comme une diffusion de la solution elle-même. Cette diffusion reçoit le nom d'osmose, lorsqu'elle a lieu au travers de parois perméables. Dans ce cas, il se produit, le plus souvent, un échange réciproque de liquide à travers la paroi, et l'osmose du liquide le moins dense l'emporte sur celle du plus dense. On peut dire que la nature d'une paroi poreuse exerce

une sélection entre les substances composant la solution, en ce sens qu'elle détermine celles qu'elle laissera passer. Une membrane telle que du parchemin, se trouvant en contact, d'un côté avec de l'eau, et de l'autre avec un mélange de gomme et de chlorure de sodium, sépare le sel de la gomme, laissant passer le premier et arrêtant la gomme, qui est de plus en plus diluée par l'eau qui traverse la membrane en sens inverse. Ce mode de séparation a reçu le nom de dialyse. C'est par ce moyen que l'on a obtenu plusieurs solutions de corps jusqu'alors réputés insolubles dans l'eau. L'alumine soluble, par exemple, s'obtient en diffusant l'acide chlorhydrique d'une solution de chlorure d'aluminium dans l'eau. On nomme corps cristalloïdes ceux qui peuvent traverser ces diaphragmes, et corps colloïdes ceux qui sont interceptés. Les diaphragmes eux-mêmes rentrent, dans ce cas, dans la catégorie des corps colloïdes. A l'état solide les colloïdes sont amorphes.

L'énergie de diffusion d'un solide dans un gaz, et celle d'un liquide dans un gaz ou dans un espace vide, se mesure ordinairement par la tension de vapeur, c'est-à-dire par le choc de la vapeur du solide ou du liquide, choc qui a pour mesure la dépression de la colonne barométrique, au moment où l'on introduit le corps dans le gaz ou dans l'espace vide. La tension de vapeur ainsi produite augmente toujours avec la température. Elle est toujours la même, quelle que soit la nature du gaz qui remplit en partie l'espace vide.

Mais la tension de vapeur ne saurait servir de mesure directe pour la vitesse avec laquelle cette vaporisation a lieu lorsqu'un courant gazeux, continuellement renouvelé, balaie la surface vaporisable d'un solide ou d'un liquide. Dans ce cas, la nature propre du gaz, ainsi que celle du corps solide ou liquide, influent l'une et l'autre sur le phénomène. Par exemple, les conditions restant les mêmes, l'alcool s'évapore plus rapidement dans un courant de gaz oléfiant que dans l'air, ce qui tient à l'inégale solubilité de ces gaz dans le liquide. De plus, tandis que la

tension de la vapeur d'eau est continue, jusqu'à son maximum de densité, l'évaporation a une tendance à diminuer au-dessous de ce point, étant alors maîtrisée mais non pas supprimée par l'abaissement de température.

La liquéfaction d'un gaz, alors qu'il est absorbé dans un liquide, est aussi influencée par la nature chimique de ces corps, ainsi que par leur température commune et la pression, à laquelle ils sont soumis. La solubilité augmente avec la pression et, à moins qu'il ne se produise une combinaison chimique du gaz avec le liquide, la solubilité du premier dans le second varie dans le même sens que l'évaporation du liquide dans le gaz.

La diffusion d'un gaz dans un autre, lorsque ces deux corps sont en contact immédiat, échappe presque à toute mesure à cause de sa trop grande rapidité. Mais, si l'on interpose un diaphragme entre les deux masses gazeuses, il se produit une diffusion semblable à celle qui a lieu entre les liquides. Le gaz le moins dense traverse le diaphragme avec la plus grande rapidité, et cette différence de vitesse peut être la source d'une force puissante.

FRÉDÉRIC GUTHRIE.

II.—Instruments se rapportant aux Fluides.

Dans les contrées dont la fertilité est susceptible d'être beaucoup augmentée par l'irrigation, les esprits ingénieux ont naturellement dirigé leur attention sur les meilleurs moyens de diminuer le travail que nécessite l'élévation de l'eau. Aussi voyons-nous qu'en Chine, aux Indes et surtout en Egypte, on a de bonne heure fait de grands progrès dans l'art de produire et de diriger les mouvements de l'eau.

La première pompe fonctionnant au moyen d'un piston, paraît avoir été celle qui fut inventée par Ctésibius d'Alexandrie, environ 130 avant J.-C.

Le mécanisme de cette machine, telle qu'elle est décrite par Vitruve, ressemblait à celui de nos pompes à incendie. Il se composait de deux cylindres déversant alternativement leur eau dans un récipient clos, contenant de l'air à sa partie supérieure. Cet espace plein d'air jouait le rôle d'un réservoir de force, servant à égaliser la pression sous laquelle le liquide s'échappait par le tuyau de débit.

Héron, disciple de Ctésibius, inventa un grand nombre de machines ingénieuses. Il se complaisait dans de singulières combinaisons de siphons, au moyen desquels les fontaines entraient en jeu dans des conditions inusitées. De nos jours de semblables machines seraient considérées comme de simples jouets. Mais, bien qu'elles n'aient plus aucune valeur scientifique, nous devons les considérer comme les premiers exemples d'appareils construits, non pas en vue de servir directement aux besoins ou aux fantaisies de l'homme, mais pour provoquer et satisfaire sa curiosité à l'égard des phénomènes les moins ordinaires de la nature.

Depuis l'époque de Ctésibius et de Héron jusqu'à celle de Galilée (1600), les pompes ont été construites, moins dans des buts scientifiques, qu'en vue de leur utilité pratique, et on développa

beaucoup l'art de fabriquer les cylindres et les pistons de manière à les faire travailler avec un certain degré de précision.

Galilée montra que, si l'eau monte dans la pompe aspirante, ce n'est point que la nature ait horreur du vide, mais parce que la pression de l'atmosphère agit sur la surface libre du liquide, et il fit voir que cette pression n'est pas capable de soulever l'eau au-delà d'une hauteur de 34 pieds. En effet, dès que cette élévation est dépassée, l'eau cesse de s'élever, ce qui prouve, ou bien que la pression de l'atmosphère est dès lors équilibrée par la colonne liquide, ou bien que la nature s'est réconciliée avec le vide.

Dès lors la production du vide est devenue le but scientifique d'un grand nombre d'inventeurs. Torricelli, élève de Galilée, en 1642, fit le plus grand progrès dans cette voie en remplissant de mercure un tube fermé à une de ses extrémités et en le retournant ensuite de manière à faire plonger son extrémité ouverte dans un vase plein de mercure. Lorsque le tube avait une longueur suffisante le mercure s'abaissait en laissant un espace vide au-dessus de lui au sommet du tube. D'après cette expérience le vide réalisé, en remplissant ainsi de mercure un récipient dont on retire ensuite le contenu, sans y laisser pénétrer d'autre matière, a été appelé vide de Torricelli. Ce savant a donc produit du même coup la pompe à mercure et le baromètre, bien que l'histoire subséquente de ces deux instruments soit fort différente.

Un peu avant 1654, Otto de Guericke de Magdebourg appliqua le premier le principe de la pompe ordinaire à la production du vide. L'agencement des pistons dans les pompes de cette époque, bien que suffisamment imperméable à l'eau, ne l'était cependant pas encore à l'air. Pour parer à cet inconvénient Otto de Guericke imagina d'abord de remplir un récipient d'eau, qu'il absorbait ensuite au moyen d'une pompe à eau. Ses premières expériences furent souvent malheureuses, mais il n'en continua pas moins à améliorer peu à peu ses appareils. Il parvint ainsi non-seulement à réaliser la plupart des phénomènes, qui se dé-

montrent aujourd'hui au moyen de récipients vides d'air, mais il finit même par découvrir la cause de l'imperfection du vide qu'il obtenait, en se servant d'eau pour empêcher l'accès de l'air dans la pompe.

En 1658 Hooke fabriqua une pompe à air destinée à Boyle, dans le laboratoire duquel il travaillait comme assistant. Cette pompe était plus commode que celle de Guericke, mais le vide n'y était pas si parfait. Toutefois les nombreuses et judicieuses expériences de Boyle valurent au vide réalisé dans le récipient de cette pompe à air, le nom de vide de Boyle, sous lequel il a été longtemps désigné dans la plus grande partie de l'Europe. La pompe à air de Hooke avait deux cylindres et, après quelques améliorations introduites par Hauksbee, elle est restée en usage jusqu'à l'invention de la pompe de Smeaton, qui ne la supplanta cependant jamais complètement.*

L'histoire de la pompe à air, depuis cette époque, mentionne surtout des dispositions imaginées pour assurer le jeu des soupapes, après que l'air restant a cessé de pouvoir les faire fonctionner, ainsi que plusieurs méthodes destinées à rendre les différentes parties de la pompe imperméables à l'air, sans l'emploi de substances dont la vapeur pourrait se répandre dans l'espace vide d'air.

Il y a, pourtant, une sorte de pompe à air qui mérite spécialement d'être mentionnée parce qu'elle ne renferme aucun tampon, ni aucune substance lubréfiante. C'est la pompe à air construite par M. Deleuil de Paris,† dont les pistons sont des cylindres pleins, de grande longueur qui, n'étant pas serrés contre les corps de pompe, jouent librement sans le secours d'aucune matière grasse. L'espace compris entre le piston et le corps de pompe contient, il est vrai, de l'air, mais le frottement interne de cet air est si considérable dans cet étroit espace, que la vitesse avec laquelle il s'écoule dans le vide de la pompe, n'est pas à com-

* Thomas Young's Lectures on Nat. Phil. (1807). Lecture xxx.

† Comptes Rendus, t. lx. p. 571. Carl's Repertorium.

parer avec celle de l'aspiration de la pompe dans le récipient. Il a, d'ailleurs, été établi, par l'auteur même de cet écrit, que le frottement interne de l'air ne diminue pas sensiblement avec sa densité. C'est ce qui fait que cette pompe travaille avec avantage jusqu'à ce qu'elle ait produit un épuisement considérable.

On se sert encore aujourd'hui des pompes de cette espèce lorsqu'il s'agit de faire le vide dans des récipients de grande dimension. Toutefois, depuis que les propriétés physiques des gaz très-raréfiés sont l'objet de recherches scientifiques, la méthode primitive de Torricelli est revenue en usage sous diverses formes.

C'est ainsi que, dans une catégorie de pompes à mercure, ce liquide, après avoir rempli un réservoir de manière à en chasser tout l'air, s'écoule ensuite en le laissant vide. La pompe de Sprengel est le type d'un autre mode de construction. La partie active de cet appareil consiste en un tube vertical plus long que la hauteur du baromètre, et si étroit qu'une petite masse de mercure qui s'y trouve, en remplit tout le calibre intérieur, en vertu de la tension de surface qu'elle subit. On introduit le mercure par le sommet du tube au moyen d'un petit tube en caoutchouc dont le débit se règle par une pince. Le mercure s'écoule, de la sorte, en petites masses distinctes dont chacune chasse devant elle l'air qui se trouve dans le tube et qui s'échappe dans une auge pleine de mercure, où plonge l'extrémité inférieure de ce tube.

Le récipient dans lequel on veut faire le vide est relié à l'appareil au moyen d'un conduit qui communique avec la partie supérieure du tube. L'air ou tout autre gaz contenu dans ce récipient se dilate dans le vide, que les gouttes de mercure laissent derrière elles, en s'écoulant dans le tube vertical, et il est ainsi entraîné avec elles dans l'auge où on peut le recueillir.

Tant que la raréfaction n'est pas avancée, la quantité d'air qui s'introduit entre les gouttes de mercure est assez considérable pour

amortir leur mouvement, mais à mesure que la raréfaction augmente, ces gouttes se rapprochent les unes des autres et leur chute produit un son de plus en plus aigu, à mesure que le vide devient plus parfait.

Après que la pompe à mercure a fonctionné pendant quelques heures, il ne reste presque plus de matière dans le récipient. Si les tubes sont réunis par des caoutchoucs, il peut bien encore exister dans l'appareil des traces de matière gazeuse émise par cette substance. Pour que le vide atteigne un haut degré de perfection, il est donc nécessaire que toutes les joints de l'appareil soient rendus hermétiques par la fusion du verre; mais en dépit de cette précaution, il reste encore des traces de matière dans le récipient. D'abord il s'y trouve nécessairement des vapeurs mercurielles, et en outre les parois de verre retiennent longtemps une certaine quantité d'eau, qu'elles n'abandonnent que lentement, après que toute autre matière a disparu.

On peut diminuer notablement la quantité de ces vapeurs mercurielles ainsi que de l'eau en mêlant au mercure un peu d'acide sulfurique concentré.

MM. Kundt et Warbourg sont encore parvenus à diminuer ce résidu aqueux, en chauffant le récipient à la température la plus élevée que le verre puisse supporter, pendant le fonctionnement de la pompe.

Une méthode, longtemps employée pour obtenir un bon vide, consiste à placer un bâton de potasse fondue dans un récipient préalablement rempli d'acide carbonique et que l'on ferme ensuite, après y avoir fait le vide aussi complètement que possible. On chauffe alors la potasse et, lorsqu'elle s'est refroidie, on trouve qu'elle s'est combinée avec la plus grande partie de l'acide carbonique qui restait dans l'appareil.

M. le professeur Dewar a imaginé une autre méthode, qui consiste à introduire dans le récipient un morceau de charbon de coco récemment calciné, et à le chauffer de nouveau fortement vers la fin du travail de la pompe à mercure. Après cela on bouche le

récipient, et le charbon en se refroidissant absorbe une très-grande proportion du résidu gazeux.

L'intérieur d'un récipient tout à fait vide d'air jouit de propriétés remarquables.

L'une d'elles fournit une manière commode d'apprécier le degré de perfection du vide obtenu. Dans ce but on ajoute à l'appareil deux électrodes métalliques, qui pénètrent dans le récipient, où leurs extrémités se trouvent séparées l'une de l'autre par la distance d'un quart de pouce. Tant que ce récipient contient encore de l'air à la pression ordinaire, il faut employer une force électromotrice considérable pour lancer une étincelle électrique entre ces deux pointes métalliques. La résistance à la décharge diminue à mesure que le vide devient plus complet, et jusqu'à ce que la pression soit réduite à n'être plus que de 1 millimètre de mercure. Lorsque la raréfaction a dépassé cette limite, la décharge ne peut plus avoir lieu entre les électrodes à l'intérieur du récipient, et l'étincelle se produit alors en dehors, à travers plusieurs pouces d'air, plutôt que de franchir dans le vide intérieur l'intervalle compris entre les extrémités des électrodes. Le vide est donc un isolant plus parfait que tout autre milieu.

MM. Kundt et Warbourg ont étudié la viscosité ainsi que la conductibilité calorifique de l'air qui reste dans le récipient après qu'on y a fait le vide. Ils ont constaté que sa viscosité et sa conductibilité ne commencent à diminuer sensiblement que lorsque le vide est très-avancé, même lorsque la couche sur laquelle on opère est très-mince.

Cependant le phénomène le plus remarquable que l'on ait encore observé dans un espace vide est celui qui a été découvert par M. Crookes. Un corps léger est délicatement suspendu dans un tube dans lequel on a fait le vide, et on projette sur lui la radiation du soleil ou de toute autre source de lumière ou de chaleur. Le corps suspendu paraît alors être repoussé, et il s'éloigne de la source de radiation.

Cette action répulsive, d'autant plus énergique que le vide est

plus complet, devient très-faible lorsque la pression atteint un ou deux millimètres. Sous une plus forte pression, elle se change même en une attraction, qui n'a cependant jamais, ni la régularité, ni l'intensité de la répulsion, telle qu'elle a lieu dans un espace très-raréfié.

Ces exemples font comprendre quelles importantes découvertes scientifiques pourraient résulter d'un perfectionnement dans la manière de faire le vide.

J. CLERK-MAXWELL.

INSTRUMENTS D'ACOUSTIQUE.

Au point de vue physique, on peut définir le *Son* une vibration appréciable à l'oreille. À sa limite inférieure, il ne se distingue pas d'une vibration perçue par le tact, d'où résulte qu'on ne peut déterminer avec précision le point où il commence à revêtir le caractère musical. On dit ordinairement que ce point correspond à trente-deux vibrations simples, ou à seize vibrations doubles par seconde. Nous indiquerons plus loin les appareils destinés à en donner la preuve. Quant à sa limite supérieure, elle est encore plus variable : il est probable que la note la plus aiguë résulte de 73,000 vibrations simples, ou 36,500 vibrations doubles par seconde. Deux tuyaux d'orgue, qui font partie de l'Exposition, produisent individuellement un son inaudible, tandis que le son résultant de leur jeu simultané est en deçà des limites de l'ouïe.

La ligne de démarcation entre le simple bruit et le son musical paraît également être vague. On doit au Dr. Haughton la preuve ingénieuse que le roulement des véhicules sur des pierres de mêmes dimensions devient musical pour une certaine vitesse. Une oreille exercée peut dégager et saisir, pour ainsi dire, de grandes harmonies d'orgue dans le bruit confus produit par le passage d'un train dans un tunnel. Une planche qui tombe dans le Palais de Cristal engendre des notes musicales par des réflexions périodiques à des intervalles égaux. D'autre part, les castagnettes, les tam-tams, les tambourins, les triangles, les cymbales, tous

instruments de musique proprement dits, ne donnent qu'un bruit analogue à celui du canon, dont les Russes renforcent la musique italienne, ou des cent enclumes sur lesquelles on "jouait" au grand festival de Boston. Beethoven lui-même, dans une de ses grandes symphonies, produit un effet musical en faisant retentir simultanément toutes les notes de la gamme.

Ces remarques ont surtout trait aux procédés instrumentaux qui produisent le son. On a donné, dans l'introduction de ce Guide, un exposé très-clair de l'acoustique au point de vue physique. Mais si l'on veut franchir la distance qui sépare cette science de l'art musical, il faut la considérer avec plus de détails. Par exemple, outre—

1° Le mode de production des sons,

2° Leur mode de propagation,

3° La mesure du nombre de vibrations dont ils résultent,

il faut donner une place importante à :

4° L'histoire et la variation de peuple à peuple du son musical, sans omettre—

5° Les divers tempéraments et accords, ni les effets de la chaleur sur les corps sonores.

6° Enfin la liste devra comprendre les applications spéciales à la musique.

1° La meilleure classification des moyens de produire les sons consiste à les rapporter à des types définis, tels que les suivants :

Ressorts ou verges.—Guimbarde, harmonica à cloux (nail-fiddle), boite à musique, diapason, ressort-timbre, tube résonnant de Wheatstone.

Cloches.—Sphériques ou de formes irrégulières ; verres musicaux.

Plaques.—En acier, verre, pierre, ou bois ; harmonicas, gongs, cloches birmanes, instruments indiens.

Cordes.—Pincées, frappées, excitées avec un archet, ou par le vent, cordes droites simples ou chargées, cordes

roulées en spirales. Emploi de l'électricité, du vent ou de compressions élastiques pour soutenir le son de verges ou de cordes.

Membranes.—Timbales, etc.

Tuyaux.—Tuyaux d'orgue, en bois, métal, roseau.

Anches.—Libres, battantes, formées de cordes ou de ressorts.

Flammes musicales.—Pyrophone.

2° On peut étudier les modes de propagation dans :

L'air.—Tubes acoustiques, porte-voix, pavillons des instruments à vent, expériences sur la vitesse, renforcement par les résonnateurs, caisses renforçantes comme dans les instruments de l'Inde et les théâtres de la Grèce.

Le métal.—Fils, destruction de l'écho par interférence.

Le bois.—Téléphone.

3° On détermine le ton d'un son par la roue de Savart, les sirènes, les méthodes optiques et graphiques, les battements et les interférences.

4° Histoire et ethnologie des sons à l'aide des anciens instruments et de leurs reproductions ; tuyaux égyptiens, orgues hydrauliques, instruments orientaux et nationaux.

5° Les tempéraments, etc. Inventions de Perronet Thompson, duodènes d'Ellis, harmonium de Bosanquet. Effets de la chaleur et de l'électricité.

6° Applications spéciales à la musique. Découvertes relatives au timbre, ou qualité des sons.

L'Acoustique au Point de Vue physiologique.

Nous avons déjà mentionné ce qui est relatif à la perception des sons aigus. L'exposition contient un instrument très-ingénieux, à l'aide duquel on peut déterminer la limite inférieure de la sonorité musicale. Le professeur Helmholtz avait expérimenté avec une corde mince, chargée d'une pièce de cuivre, mais

elle n'était susceptible que d'une consonnance renforçante très-faible, en sorte que le son s'évanouissait vite. Dans l'instrument de MM. Elliot, et dans la contre-basse à quatre cordes qu'ils mettent sous les yeux du public, ils réalisent de meilleures conditions pour obtenir une vibration sympathique. Comme ils mettent en vibration une masse d'air plus considérable, ils parviennent à produire des notes ayant un caractère musical, dont la tonalité est considérablement plus grave dans l'échelle des sons.

La perception de la netteté des sons, de leur harmonie, des discordances et des successions mélodiques paraît être, à un haut degré, le résultat de la pratique, aidée par une sensibilité naturelle de l'oreille de l'élève.

1° Les *modes de production* des sons sont presque innombrables si on tient compte de toutes leurs variétés.

Dans la classe des ressorts ou des verges, l'harmonica à cloux paraît être l'instrument le plus élémentaire. Il est formé d'un cercle de tiges vibrantes métalliques, dont chacune correspond à une note donnée, et qu'on met en vibration avec un archet ou avec le doigt. Dans la boîte à musique, les lames vibrantes sont disposées comme les dents d'un peigne : elles sont rendues suffisamment lourdes à leur face inférieure, et soulevées par des pointes d'acier implantées à la surface d'un cylindre que fait tourner un mécanisme d'horlogerie réglé par un volant. Dans la harpe des Juifs (ou guimbarde) la note rendue varie avec le volume de l'air contenu dans la cavité de la bouche, parce que le faible ressort (ou anche) de l'instrument est susceptible de s'accommoder à des vibrations de rapidités très-diverses.

Dans les diapasons, la nécessité de fixer d'une manière ferme la base de la tige vibrante exige l'emploi d'une seconde tige semblable, laquelle, vibrant dans une direction opposée, maintient la masse tout entière en équilibre. MM. Cramer et Cie. ont exposé un instrument à clavier formé de tiges simples frappées par des marteaux.

Les ressorts-timbres des horloges américaines et autres sont contournés en spirales plates. Leur extrémité extérieure est fixée à une masse métallique pesante, qui est vissée solidement au bois de la cage. Quand ils sont frappés par un marteau près de leur bout fixe, ils produisent des notes complexes très-graves qui ressemblent fort à celles d'une grande cloche d'église.

On trouve des plaques acoustiques dans divers instruments qu'on appelle vulgairement harmonicas, et qui sont faits de bois, de verre, d'acier ou même de pierre dure. Plusieurs instruments orientaux sont formés de bois, ordinairement de la couche extérieure siliceuse du bambou : ils sont remarquables par la présence de résonnateurs qui renforcent la note et sur lesquels nous reviendrons. Ils donnent des sonorités d'une puissance et d'une pureté étonnantes. Tel est le xylophone qui a été joué récemment dans plusieurs concerts à Londres. Il y a quelques années, on a aussi entendu l'harmonica de pierre, formé de barres de schiste cristallin.* C'est pour un instrument semblable, probablement fait en acier, que Mozart a écrit un passage de sa *Flûte enchantée*, où il s'agit d'imiter les sons du sistre que manie Papageno. La cloche chinoise, est un exemple remarquable d'une grande plaque métallique vibrante ; on en voit une dans la collection.

Les cloches proprement dites sont des vases d'une forme hémisphérique, comme dans les horloges, ou d'un contour très-compliqué, comme dans les cloches d'églises ou d'appartements.

Les verres à musique, autrefois très-renommés et qui ont repris faveur récemment, étaient un assemblage de vases en verre choisis de manière à produire approximativement une gamme, et qu'on mettait au ton en y versant de l'eau. On les faisait retentir en frottant leur bord libre avec le doigt humide, ou avec un drap mouillé. On peut voir dans la collection un arrangement perfectionné qui consiste à fixer les cloches ou verres à une

* Ou plutôt de rognons de silex, qui abondent dans la craie des environs de Paris et qu'on avait convenablement choisis et taillés.—(E. W.)

broche tournante; on les excite pendant leur rotation avec un corps humide. On obtient ainsi des sons continus, d'un timbre particulièrement plein, mais dont on est vite las.

Il existe trop de variétés de cordes pour qu'on puisse les mentionner ici. Les principales nouveautés exposées sont les cordes contournées en spirales plates, et une corde filée d'un cordon lourd, tendue sur une contre-basse, et qui rend l'ut de 16 pieds, sans que sa longueur soit démesurée.

Les cordes contournées en hélice (open coil) avaient déjà été essayées, mais sans succès, l'hélice n'étant pas capable de supporter la tension nécessaire. Cette difficulté a été surmontée par M. Baillie Hamilton, qui a inventé un moyen d'enrouler et de tremper les fils d'acier suivant une forme telle que l'hélice peut résister à toute pression applicable aux cordes de piano. De plus, comme l'effort qui s'exerce sur chaque hélice est essentiellement latéral, la tension est celle d'un ressort, et elle se trouve peu affectée par les causes qui modifient la tonalité des cordes ordinaires. Il est inutile d'insister sur l'avantage de gagner plus que la longueur de la corde d'un grand piano à queue dans l'espace occupé par celle d'un petit piano droit.

Les tuyaux à bouche et à anche présentent les mêmes difficultés. On voit exposées les diverses formes des premiers. Les seconds, sont pourvus tantôt d'anches libres, comme dans la "séraphine," l'harmonium, et l'orgue de Barbarie, tantôt d'anches battantes, comme dans l'orgue, la clarinette et d'autres instruments d'orchestre.

C'est dans les tambours que les membranes sont surtout employées. On en distingue trois variétés, le tambour militaire, la grosse caisse et la timbale. Le premier produit un son haut mais indéterminé, dont le pouvoir pénétrant est accru par le "timbre," double corde de boyau tendue fortement comme un diamètre contre la membrane inférieure. Le tambour de basse, ou grosse caisse, engendre un son extrêmement grave et qu'on ne peut pas non plus caractériser dans sa tonalité. Ces deux instru-

ments sont surtout employés à marquer la mesure et comme l'accentuation des morceaux d'ensemble. Quant à la timbale employée dans les orchestres, c'est un instrument plus musical à proprement parler, que les deux précédents. Sa tonalité est celle d'un tuyau d'orgue de huit pieds (fermé) ou de seize pieds (ouvert). On se sert ordinairement de deux timbales, dont l'une donne le son fondamental ou la tonique de l'air, l'autre la dominante ou quinte. On a quelquefois recours à un plus grand nombre de ces instruments pour produire certains effets déterminés. Berlioz a proposé d'en étendre l'usage. Dans son Requiem, il a introduit un passage destiné à être exécuté par douze timbales accordées à des intervalles de demi-tons et formant ainsi une gamme chromatique.

La propagation du Son dans l'air a été étudiée par une Commission française en 1822. Les observateurs formaient deux groupes, placés à Montlhéry et à Villejuif. De chacune de ces stations, on tira alternativement douze coups de canon ; on mesura le temps qui s'écoulait entre la vue du feu et l'arrivée du son, et l'on en déduisit que celui-ci parcourt 340,9 mètres par seconde à 16° C.

Dans l'eau, d'excellentes observations ont été faites par Colladon et Sturm sur le lac de Genève. On produisait le son par le choc d'un marteau contre une cloche submergée, et au même instant on enflammait de la poudre. Le son était perçu par une sorte de cornet acoustique long de 3 à 4 mètres, qu'on voit à l'Exposition, dont le pavillon inférieur, immergé, était fermé par une plaque métallique. La distance de 13,487 mètres entre les deux stations fut traversée en 9,25 secondes, ce qui équivaut à une vitesse de 1435 mètres par seconde dans l'eau à 8° C.

Dans un tube de fer, Biot a trouvé une rapidité de 3250 mètres par seconde.

Dans le bois, la transmission a été démontrée par Wheatstone d'une façon très-ingénieuse. Son téléphone consiste en longues baguettes de sapin fixées à divers instruments dans une chambre

située à un étage inférieur. Vient-on à attacher, dans un étage supérieur, un corps sonore à leur autre extrémité, on reproduit d'une manière distincte non-seulement le ton mais aussi le timbre des différentes notes provenant de ces instruments.

La faculté de transmission des sonorités par le bois est chaque jour utilisée pour un but médical dans le stéthoscope.

On peut citer, dans ce paragraphe, le renforcement déterminé par les pavillons ou prolongements en trompette qui s'aperçoivent à l'extrémité inférieure d'un grand nombre d'instruments;—par le porte-voix sur la voix; par les caisses qui déterminent un effet de consonnance; dans l'harmonica de bambou déjà signalé, ainsi que dans les vases creux employés sur les théâtres de la Grèce pour renforcer la voix de l'acteur. Dans la récitation rhythmée et monotone de la tragédie grecque, nul doute que le résultat ait été favorable, bien que le contraire dût avoir lieu de nos jours avec les diversités d'inflexion des langues modernes. On peut voir l'importance de la consonnance pour accroître l'audition dans la pratique des cantilènes usitées dans nos grandes cathédrales.

L'harmonica de bambou, nommé *marimba* ou *balafo*, est pourvu d'une calebasse ou gourde desséchée, au dessous de chaque plaque sonore. Un petit orifice, percé dans la cavité de cette gourde, est dirigé de bas en haut vers la face inférieure de la plaque. Autour de ce trou on a cimenté une gourde plus petite, ouverte à ses deux extrémités, formant un cornet ou réceptacle, qui a évidemment pour but de diriger un plus grand nombre de vibrations dans la cavité consonnante.

La détermination et la mesure de la hauteur d'un son musical a été étudiée avec succès dès les temps les plus anciens. Le monocorde de Pythagore est un instrument primitif qui a encore sa valeur. On parle beaucoup actuellement du "comma pythagorien," et la division de la corde imaginée par le célèbre philosophe, qu'Euclide a suivie dans sa " Sectio Canonis," a été le fondement de la théorie mathématique de la musique.

L'orgue, mis en jeu par l'eau ou par l'air, est, avec le monocorde, le seul instrument d'une construction scientifique et mécanique qui remonte à l'âge classique. Dans l'orgue hydraulique, dont le principe est exposé dans la collection, l'air est comprimé par la pression de l'eau.

Si le monocorde a, dès l'antiquité, servi à établir les lois des cordes, les tuyaux n'ont eu aucun représentant analogue parmi les instruments scientifiques.

L'orgue lui-même est essentiellement un grand assemblage d'appareils servant à imiter les sons d'autres instruments. Nous pouvons aisément reconnaître le timbre de la flûte, de la trompette, du cor, de la voix ou d'une corde. Tandis que l'analyse des sons est une œuvre moderne, leur composition artificielle a été pratiquée depuis longtemps dans les tuyaux d'orgue et peut encore être étudiée avantageusement avec leur aide. En effet les " cornets " des anciennes orgues étaient réellement une anticipation instinctive des découvertes de Helmholtz sur la cause du timbre.

La substance des tuyaux est le bois ou le métal, suivant la forme voulue. Le bois convient pour les tuyaux rectangulaires, le métal pour les cylindriques et les coniques. La nature de la matière varie suivant la solidité qu'on désire obtenir, bien plus qu'à cause de son influence sur le son.

On distingue deux classes de tuyaux, ceux à bouche et ceux à anche, qu'on utilise suivant le mode d'excitation de la colonne d'air.

Dans les tuyaux à bouche, une lame d'air traverse une fente rectiligne. Ils sont représentés par le sifflet ordinaire.

Les tuyaux semblables au sifflet forment trois groupes, savoir les fermés, les demi-fermés et les ouverts. Chacun de ces groupes a ses caractères propres. Les tuyaux fermés ont en général un son doux et large ; les demi-clos l'ont doux et perçant ; les ouverts, qui permettent une plus libre action des harmoniques et mettent plus d'air en mouvement, ont une sonorité plus stridente, quoique pleine, se rapprochant de celle des diapasons.

En outre, les proportions des tuyaux déterminent d'innombrables modifications de son dans ces trois groupes; le diamètre influe chez les tuyaux cylindriques, la largeur d'avant en arrière chez ceux qui sont rectangulaires. La dimension de la lame d'air à la bouche, la force du courant et sa direction, déterminent toutes les variétés que comportent les dimensions du tuyau, donnant la suprématie à une certaine série d'harmoniques, ou permettant une succession relative de ceux-ci avec la tonique, comme dans les registres de la "viole de gambe."

D'autre part, les tuyaux à anche sont représentés par la trompette: les lèvres du joueur produisent le son en vibrant, pendant que l'air est introduit dans le tube. Dans un tuyau à anche la lèvre "frémissante" est remplacée par une languette métallique nommée anche "battante."

Si l'on observe qu'une forme quelconque de tuyau ouvert ou fermé peut s'accompagner d'une anche dans l'orgue, on voit qu'il est facile de varier le ton, même avec une anche toujours la même, ce qui n'a pas lieu dans la trompette. Car, suivant les proportions du tuyau, et l'ouverture plus ou moins rapide de l'angle du cône, on peut faire prédominer, ou le son fondamental, ou une série d'harmoniques, ou certains harmoniques isolés. Mais l'anche peut elle-même varier dans son élasticité, sa forme ou sa liberté de mouvement.

Dans les orgues, l'anche est presque toujours battante; la languette frappe les bords de l'ouverture qu'elle ne peut traverser.

Chez les anches libres, c'est l'inverse: elles traversent l'orifice et n'en frappent pas le contour. Elles ont été rapportées de Chine en Europe par Kratzenstein, et amenées à leur perfection par sir Charles Wheatstone. Elles sont la source des vibrations de l'air dans l'harmonium et d'autres instruments analogues. Ce qui les recommande, c'est leur bas prix et la facilité de les transporter. Les notes s'obtiennent sans le concours d'aucun corps ou tube sympathique, mais elles ont le défaut de paraître d'une sonorité peu attrayante et faible, comparée à celle de l'orgue. On y

remédie par des canaux dans les harmoniums, par la succion dans l'orgue de Barbarie, et par l'emploi de boucliers ou couverts qui éteignent et adoucissent le son.

Outre les anches battantes et libres, on a récemment introduit de nouvelles combinaisons. Le développement graduel d'une nouvelle condition des effets de l'anche est évident dans une collection d'appareils qui retrace son histoire depuis les types éoliens primitifs.

Les formes les plus simples de ces appareils se trouvent chez les sauvages qui plongent leur lance dans le sol et demeurent couchés en écoutant les sons éoliens que le vent détermine.

Ensuite, on imagina un arc ou harpe à corde qui produisait les mêmes effets. De là les diverses formes de harpe éolienne mentionnées dans les auteurs.

Puis vint la forme plus moderne revendiquée par Kircher, mais qu'on attribue avec plus de raison à un anglais nommé Pope. Elle fut suivie de l'anémocorde de Schnell, et d'autres dont les détails n'ont pas été conservés ; on se servait du vent pour mettre les cordes en vibrations plus ou moins durables. Le professeur Robison imagina ensuite un arrangement dans lequel un ruban verni, ou un fil plat, était disposé à l'intérieur d'un double tuyau d'orgue pour produire les sons éoliens. Green et Wheatstone imaginèrent un procédé pour n'agir que sur une partie de la corde. Le changement qui suivit consista dans l'adoption d'une anche libre, liée par un fil de soie à une corde de piano, comme dans l'instrument de Pope. Puis on en revint à la corde seule avec une portion aplatie, exposée à toute la force du vent, sans poussée latérale, selon l'invention de Julyan. Ensuite on remplaça la partie plate par une languette d'anche avec un fil attaché dans le prolongement de sa longueur, comme dans l'invention de Farmer, lequel sépara plus tard la languette du prolongement de la corde et les réunit par une petite pointe : Hamilton fit de même. Ensuite viennent une série d'expériences du même Hamilton en société de Hermann Smith. Le son de l'anche fut considéré, à part de

celui de la corde, et produit comme une note d'orgue. Les deux observateurs analysèrent les fonctions de la corde, la remplacèrent par d'autres corps reliés à l'anche et réagissant sur elle, puis examinèrent par expérience le mode de transmission aux corps solides. La découverte que les anches peuvent provoquer une résonance sympathique des solides conduit à un nouveau champ de recherches. Il est évident qu'il y a chez les corps solides un pouvoir de renforcement des vibrations et de réaction sur elles semblable à celui dont le violon et l'orgue sont des exemples familiers.

On entend souvent des sons d'orgue imités accidentellement dans un grand édifice. Quand on pousse un banc sur un parvis de marbre, on éveille un grand son de viole; le recul d'une chaise donne souvent naissance à un son de trompette clair, et parfois une grande porte qui se ferme lentement par son propre poids détermine un ton qui rivalise avec celui des plus graves tuyaux du pédalier. On ne peut distinguer immédiatement ces sons de ceux de l'orgue ; mais leur discontinuité et leur tonalité variable les dépouille de tous les éléments de grandeur, et les rabaisse au niveau des simples bruits.

Dans la grande collection d'appareils exposés par M. Baillie Hamilton, on peut apprécier les chances d'utiliser ces sources de sonorité, au milieu desquelles il faut placer les sons éoliens, et ceux qui s'entendent souvent avec plaisir dans la nature, mais que nous n'avons pas encore enrôlés dans nos gammes, ou déterminés à notre gré.

A l'époque de la renaissance des méthodes mécaniques destinées à la détermination d'un son, au siècle dernier, on employa un instrument primitif pour compter les vibrations, savoir la roue de Savart, dont les dents frappent sur un corps sonore quand elle tourne avec une vitesse connue. Il en résulte un son dont le ton est comparé à celui d'un étalon.

La tension et la division des cordes ont aussi été appliquées de bonne heure dans la machine à accorder de Longman et Broderip,

qui est exposée, et qui ne diffère pas essentiellement des conditions imaginées par Pythagore.

Perronet Thompson a suivi le même système et admis les quarts de ton (quarter-tones) dans son orgue enharmonique. Il se servait d'un monocorde monté avec un fil d'acier, et un poids mobile qui s'élevait dans la règle jusqu'à 250 livres.

Plus tard, la sirène, dans l'une ou l'autre de ses formes, a été principalement employée. Elle est composée d'un disque tournant percé de trous obliques, placé au contact d'un disque semblable fixe et percé de trous d'une obliquité inverse. Le courant d'air fait tourner le disque supérieur et produit un son par sa sortie périodique ; un compteur à vis enregistre la rapidité de la rotation pour une tonalité déterminée.

Il est digne de remarque que les deux moyens mécaniques précédents ont été utilisés pour la mesure des vibrations beaucoup plus rapides de la lumière, savoir la roue dentée par M. Fizeau, dans des expériences qui ont été récemment répétées par M. Cornu avec un soin extrême, et la sirène par M. Foucault.

Le procédé optique et le procédé graphique sont d'autres moyens de mesure qui se retrouvent dans les appareils de M. Lissajous, dans le microscope vibrant d'Helmholtz, dans les traceurs de courbe de MM. Donkin et Tisley et dans le phonautographe. Les deux premiers de ces appareils fournissent des figures qui servent aussi à illustrer les phénomènes de la polarisation circulaire et de la polarisation elliptique.

Enfin la méthode des battements et des interférences donne le meilleur moyen pratique pour accorder les instruments et comparer les tonalités. Helmholtz a discuté récemment toutes ces matières dans son grand ouvrage intitulé *Les sensations sonores* (*Die Tonempfindungen*).

HISTOIRE ET ETHNOLOGIE.

Dans l'étude de l'acoustique comme dans celle des autres branches de la science, il est de la plus grande importance de

considérer l'histoire et les rapports de ses développements devenus maintenant si connus. Grâce à l'obligeante coopération de M. W. Chappell, il a été possible d'exposer une suite d'anciens tuyaux, reproduits en fac-simile d'après ceux qu'on a trouvés dans les tombeaux de l'Égypte et qui sont conservés dans les collections du Musée Britannique et dans celles du Continent. Ces tuyaux présentent des anches complètes, et donnent une juste idée de l'échelle musicale d'après laquelle on les jouait.

On ne peut traiter que d'une manière très-incomplète dans une exposition les applications de l'acoustique théorique à la musique proprement dite. Mais on ne saurait omettre les grandes découvertes de Helmholtz sur le timbre. On verra les appareils qui lui ont permis d'étudier les sons résultants par addition, ainsi que les divers systèmes d'intonation exacte, opposés au tempérament égal. Le défaut principal de la plupart de ces systèmes est la grande complication des claviers. Elle a été ingénieusement évitée dans l'harmonium de M. Ellis, construit d'après le plan proposé dans son mémoire sur les Duodènes, lu à la Société Royale. Il y conserve les douze touches ordinaires de l'octave, et produit les diverses notes au moyen de soupapes qui ouvrent diverses combinaisons. On a exposé également des appareils propres à manifester l'effet de la chaleur et de l'électricité sur les corps vibrants.

On peut résumer tout le sujet dans les propositions suivantes :

1° L'influence réciproque des appareils scientifiques sur l'art musical et *vice-versâ*.

Au début, nous rencontrons le monocorde de Pythagore qui offre d'immenses résultats pratiques à la musique. Vient ensuite une longue période durant laquelle les applications instrumentales deviennent nombreuses, mais sans but déterminé et sans théorie. Les découvertes d'instruments nouveaux ou perfectionnés étaient purement techniques, souvent fortuites, quoique tout nouveau membre ajouté aux précédents dans cette série fût un mécanisme ouvert à l'analyse scientifique.

Pendant le dernier siècle, on en revint aux appareils essentiellement scientifiques pour expliquer ce qui avait été découvert dans le champ de la musique. Bientôt après nous trouvons :

2° L'influence réciproque des instruments sur ces appareils. Le meilleur exemple qu'on en puisse citer est la découverte du son *résultant* ou "Terzo Suono," par Tartini. Ce grand violoniste l'indiquait à ses élèves comme un moyen d'obtenir des accords exacts ; en réalité ce moyen renfermait un principe d'acoustique nouveau et important.

3° Dans nombre de cas les instruments de musique ont pris actuellement la place des appareils. À y bien songer, toute note musicale est par elle-même un fait mathématique, indépendant de l'émotion et du plaisir que sa production artistique a le pouvoir d'exciter. D'autre part l'acte d'accorder et d'entonner, entièrement abandonné d'abord à l'oreille délicate et exercée d'un artiste de talent, est devenu une branche de la science, avec ses lois définies et ses règles pratiques. Les écarts que les anciens violonistes se permettaient instinctivement par rapport à une tonalité fixe, s'expliquent de nos jours. On est même parvenu à montrer que la disposition d'instruments variés, dans un orchestre, est bonne ou mauvaise, suivant que les harmoniques de chaque ton spécial sont consonnants ou dissonnants.

LUMIÈRE.

I.—Instruments d'Optique.

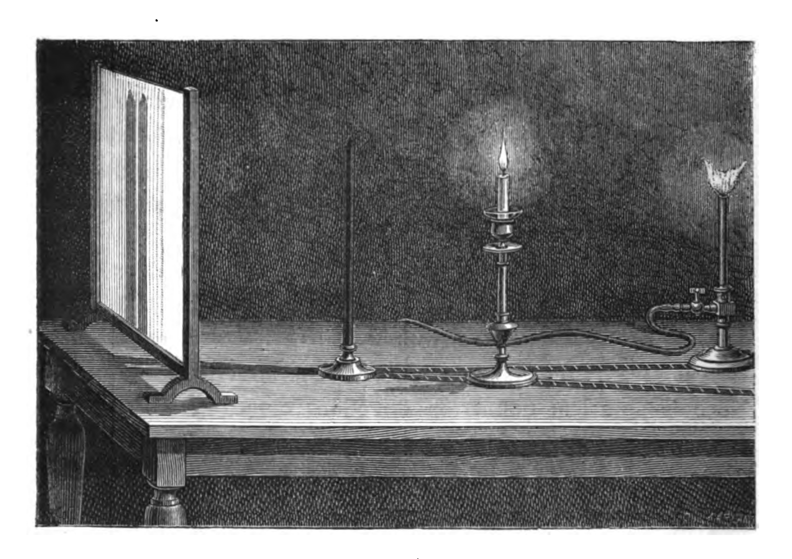
Les instruments employés dans cette branche de la science peuvent se grouper sous les chefs suivants : Production de la lumière, Mesure de son intensité et de sa vitesse, Action de la matière sur la lumière, Action de la lumière sur la lumière, Action de la lumière sur la matière, Applications techniques des principes de l'Optique.

La source de lumière la plus commune est celle du soleil, et pour plusieurs expériences la lumière diffuse est suffisante ; mais si on a besoin d'une lumière plus intense, il faut recourir aux rayons solaires directs en les faisant réfléchir d'une manière convenable pour leur donner la direction voulue. Un des grands avantages des rayons solaires, c'est qu'ils sont parallèles, tandisque ceux qui proviennent d'autres sources lumineuses ne le deviennent que par l'emploi d'un système de lentilles.

Les appareils le plus généralement employés pour la production de la lumière artificielle sont la lumière oxyhydrique et la lumière électrique. On produit la lumière oxyhydrique par la combustion de l'oxygène et de l'hydrogène, que l'on fait arriver sur un cylindre ou un disque de chaux. On peut remplacer l'hydrogène par du gaz d'éclairage, mais alors la consommation de l'oxygène est plus grande. Les gaz employés sont quelquefois renfermés dans des sacs soumis à une certaine pression, mais depuis quelque temps on préfère les comprimer dans des vases en fer. Le bec par lequel sort l'hydrogène diffère légèrement de celui employé pour

le gaz d'éclairage. On a proposé de remplacer la chaux vive par des cylindres de zircone ; lorsqu'ils ont été parfaitement calcinés ils sont très-convenables, mais jusqu'à présent cette fabrication n'a pas pris une grande extension.

La lumière électrique est beaucoup plus intense et elle réalise l'effet d'un point lumineux bien mieux que la surface incandescente de la chaux dans la lumière oxyhydrique ; mais elle exige pour être produite une lampe d'une construction compliquée,

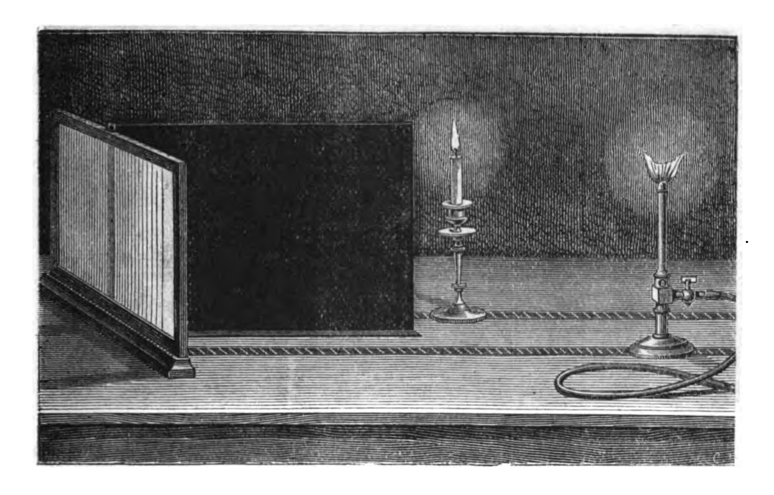


et plus d'attention pendant qu'elle fonctionne. La lumière électrique résulte de l'incandescence du carbone sous l'action d'un puissant courant électrique, qu'on produit en général au moyen de 40 à 50 éléments de Grove ou de Bunsen. Diverses formes de lampes électriques ont été construites et il y a encore beaucoup à faire pour les rendre réellement pratiques. Les deux modèles les plus employés sont : (1) celui de Serrin, dont on se sert beaucoup en France et qui convient mieux pour un éclairage général que pour des expériences d'optique ; (2) le régulateur

Foucault, construit par Duboscq. Depuis quelque temps on a substitué aux piles, les machines dynamo-électriques imaginées par Clarke, Holm, Wild et dernièrement par Gramme; cette dernière, quoique la plus puissante, n'en est cependant encore qu'à ses débuts.

D'autres machines employées pour la production de courants seront mentionnées dans le chapitre de l'Électricité.

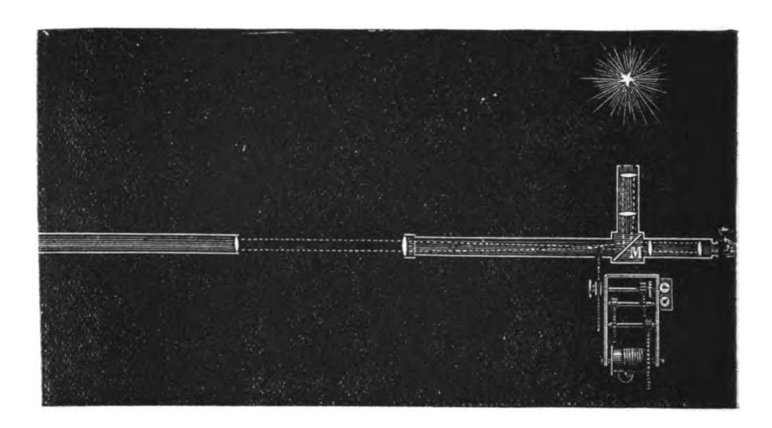
Pour mesurer l'intensité de la lumière, on a inventé divers photomètres, tels que celui de Rumford, dans lequel on compare l'intensité de deux ombres d'un même objet, produites par deux



sources lumineuses, et celui de Bunsen, où la lumière transmise à travers du papier imbibé de stéarine est comparée avec celle d'une autre source réfléchie par du papier non huilé. Dans le photomètre de Bouguer on compare l'éclat de deux portions d'une surface éclairées séparément par deux sources lumineuses, et on écarte ou on rapproche l'une d'elles, jusqu'à ce que l'éclat soit égal. Le photomètre de Ritchie est fondé sur le même principe, mais il est un peu plus simple. A côté de ces photomètres, on pourrait en citer d'autres, mais la plupart ne sont que de simples modifica-

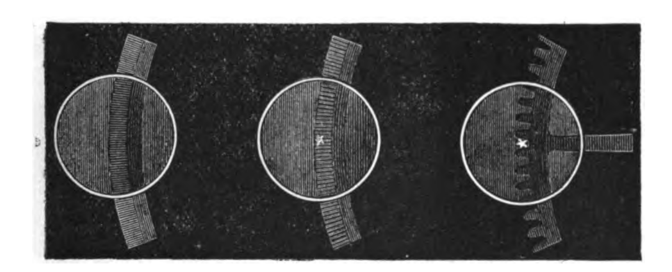
tions apportées à ceux que nous venons d'indiquer. Wheatstone a proposé un photomètre fondé sur les diverses colorations obtenues avec la lumière polarisée ; mais comme l'œil apprécie plus facilement des différences d'intensité que des différences de teintes, cette méthode ne paraît pas convenable. On a constaté dernièrement que la lumière modifie la conductibilité électrique du sélénium, et cette action pourra probablement être utilisée en photométrie. Enfin, M. Crookes a proposé aussi de se servir dans ce but de son radiomètre, dont nous parlerons plus loin.

L'étude de la vitesse de la lumière est non-seulement fort



intéressante en elle-même, comme détermination de l'une des grandes unités de la nature, mais elle est encore d'une haute importance pour l'astronomie. Plusieurs méthodes ont été employées pour cette mesure, et laissant de côté les moyens indirects, nous devons mentionner ici les deux suivants : celui du miroir tournant de Foucault, et celui de la roue dentée de Fizeau. Dans la méthode Foucault, un rayon lumineux réfléchi par un miroir tournant, est de nouveau réfléchi normalement par un miroir concave fixe ; mais dans l'intervalle qui sépare l'allée et le retour du rayon, le miroir tournant ayant subi un léger déplacement angulaire, il en résulte que le rayon se trouve devié de sa

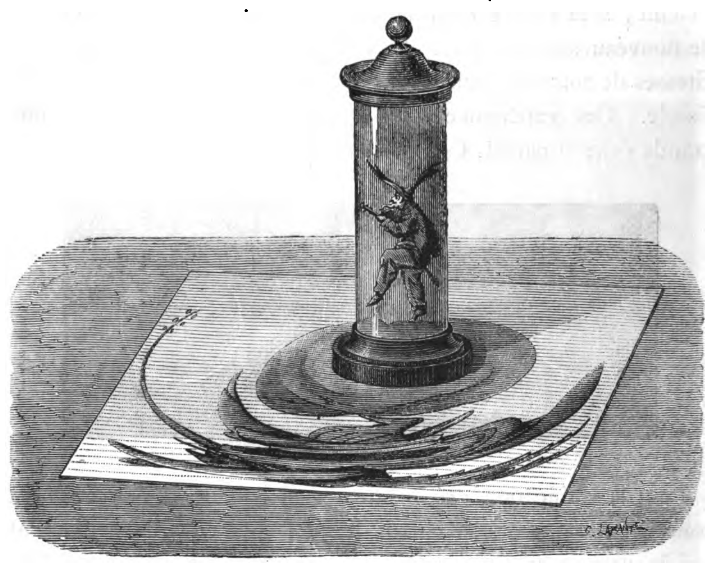
route, et c'est de cette déviation qu'il est possible de déduire sa vitesse. Dans la seconde méthode, un rayon lumineux passe entre les dents d'une route dentée tournante, pour aller se réfléchir contre un autre miroir situé à quelques kilomètres de distance et revenir sur lui-même. En général, pendant la rotation, l'observateur voit la lumière réfléchie comme un point lumineux; mais pour certaines vitesses en progression arithmétique, la lumière réfléchie se trouvant arrêtée par la présence d'une dent, le point lumineux s'éteint; si la vitesse de rotation devient triple le point reparaît de nouveau, ainsi de suite. La vitesse de la lumière se déduit des vitesses de rotation pour lesquelles le point lumineux cesse d'être visible. Ces expériences ont été récemment répétées sur une grande échelle par M. Cornu à l'Observatoire de Paris.



Pour la vérification des lois de la réflexion de la lumière, on a construit des instruments dans lesquels le rayon incident étant fixe, la surface réfléchissante peut prendre des positions variées, donnant au rayon réfléchi des directions qui se mesurent au moyen d'un cercle gradué. Tel est par exemple l'appareil de Jamin. Les miroirs en verre, argentés sur leur face postérieure, donnent lieu à plusieurs images: la première est due à la réflexion des rayons sur la face antérieure; la seconde, beaucoup plus brillante, à la réflexion sur la surface métallique postérieure; la troisième et les suivantes à des réflexions intérieures successives. Pour éviter cet inconvénient, on a construit des miroirs métalliques, et plus récemment des miroirs de verre dont la face antérieure est argentée ou platinisée.

Le platine est préférable à l'argent à cause de la rapidité avec laquelle ce dernier se ternit. Mais vu la grande chaleur à laquelle le verre doit être soumis, il est difficile d'empêcher la surface réfléchissante de se déformer. Il est regrettable que, apparemment à cause de ces difficultés, la fabrication régulière de ces miroirs ait été abandonnée soit en Angleterre soit en France.

Les miroirs sphériques convexes sont employés, soit pour la démonstration de certaines lois de l'optique, soit dans un but



décoratif. On a indiqué qu'ils peuvent avoir encore une autre application scientifique, savoir: que les images produites peuvent être regardées comme des diagrammes appartenant à un espace *non-euclidien*, dans lequel la forme et la grandeur ne restent pas les mêmes, lorsqu'une figure est déplacée d'une position à une autre, mais sont toujours fonctions de cette position. On a construit des miroirs cylindriques et coniques, qui ont pour but de donner une image rectifiée d'un dessin d'un objet, déformé selon certaines règles et placé devant eux. Cette expérience est

connue sous le nom d'anamorphose. Les miroirs coniques ou cônes réflecteurs en verre servent aussi à produire la polarisation radiale. Les miroirs paraboliques ou d'une autre courbure sont employés dans les phares et les télescopes. Les rayons émanant d'un point lumineux placé au foyer d'un miroir parabolique sont renvoyés parallèlement, et inversément les rayons parallèles, ceux du soleil, par exemple, sont réunis au foyer par un miroir parabolique.

La quantité de lumière réfléchie par des surfaces de différentes substances et sous des angles d'incidence variables, a été étudiée avec beaucoup de soin. Lorsqu'il s'agit d'un rayon lumineux polarisé ce sujet devient très-compliqué.

A propos de la réflexion de la lumière, mentionnons les instruments qui ont pour but d'envoyer un rayon solaire toujours dans la même direction, à toutes les heures du jour, au moyen d'un mouvement d'horlogerie. Parmi les meilleurs appareils de ce genre, citons l'héliostat de Foucault et celui de Silbermann. M. le professeur Stoney en a construit aussi un, qui est plus simple et moins coûteux. Le meilleur de tous est appelé sidérostat.

Ce serait peut-être entrer dans trop de détails que de parler des cadrans, des sextants, et des cercles réflecteurs employés en géodésie et pour déterminer les latitudes.

La réfraction ou le changement de direction d'un rayon lumineux, qui passe d'un milieu dans un autre, varie, comme cela est bien connu, avec la nature du milieu réfringent, l'angle d'incidence, et la couleur du rayon. Les instruments employés pour étudier les lois de la réfraction sont analogues à ceux destinés à la recherche des lois de la réflexion. Ce que l'on a à déterminer ici, c'est la relation qui existe entre les sinus des angles formés par le rayon incident et le rayon réfracté, avec la normale élevée sur la surface de séparation des deux milieux au point d'incidence, où ce qui revient au même, le rapport entre les vitesses du rayon dans les deux milieux. Dans cette étude et dans les suivantes on fait grand usage du prisme, instrument au moyen duquel on sépare les

divers rayons dont la lumière blanche est composée. Le prisme peut servir du reste dans l'étude de la réfraction, soit en employant une lumière monochromatique, comme celle obtenue avec le sodium ou l'alcool salé, soit plus généralement en employant comme source de lumière l'étincelle électrique produisant un spectre formé de raies brillantes, dont on ne considère qu'une seule à la fois, soit enfin en se servant de la lumière solaire en ne s'occupant que d'une seule raie obscure à la fois.

Si la substance est solide et transparente, on peut la tailler en un prisme ayant l'angle voulu; si elle est liquide, on l'enferme dans un prisme creux de verre ou de quartz; il faut avoir soin dans ce cas que les lames formant les côtés de ces prismes présentent des faces rigoureusement parallèles. Dans toutes les expériences faites pour déterminer l'indice de réfraction des diverses substances, le rayon doit passer au travers du prisme en suivant la direction qui donne la déviation minimum, ce qui a lieu lorsque les rayons incident et émergent font des angles égaux avec les surfaces du prisme.

Puisque les deux faces du prisme sont inclinées l'une sur l'autre, il s'ensuit que le rayon doit subir une déviation de sa direction primitive; mais il est quelquefois désirable de ramener le rayon dévié dans sa première direction, en d'autres termes de corriger sa déviation. On arrive à ce résultat en plaçant un second prisme à la suite du premier, dans une position inverse, et formé d'une substance ayant un pouvoir réfringent plus grand et un pouvoir dispersif plus faible que le précédent. Avec une série de prismes ainsi alternés on obtient des prismes à vision directe qui dispersent la lumière, mais qui pour un rayon déterminé, ordinairement un rayon de la portion jaune du spectre, ne produisent aucune déviation. Ce résultat ne peut être atteint d'une manière exacte que pour des rayons ayant une réfrangibilité particulière, c'est-à-dire pour des rayons ayant une période particulière de vibration.

Le même principe sert aussi à construire des prismes et des

lentilles achromatiques, qui ont pour but de faire disparaître les couleurs dues à la dispersion produite par une seule lentille, ou, en d'autres termes, de faire converger en un foyer commun toutes les couleurs.

Une lumière monochromatique, ou n'ayant qu'une seule couleur, ne se compose que de rayons dont les ondulations sont toutes d'une période identique et ayant par conséquent la même réfrangibilité. Le spectre d'une lumière de cette espèce ne consistera qu'en une seule raie brillante. Un faisceau lumineux peut aussi renfermer des rayons de diverses périodes définies d'ondulation; dans ce cas le spectre présentera des lignes brillantes correspondantes à ces diverses ondes, et on aura ce qu'on appelle un spectre de lignes brillantes. C'est celui qu'on obtient avec des métaux réduits en vapeur, et rendus incandescents par un courant électrique; c'est encore le cas général pour le spectre des gaz. Mais nous devons nous arrêter ici, car ce sujet nous conduirait au delà des limites qui nous sont prescrites, et nous entraînerait dans le domaine de la physique solaire.

Avec la lumière ordinaire, la couleur des corps est due à un phénomène d'absorption, c'est-à-dire à l'extinction d'un certain nombre des éléments des rayons blancs et à la transmission ou à la réflexion du reste. Quant aux rayons éteints ils se transforment en chaleur. La sélection des rayons éteints peut varier à l'infini, et il en résulte que le spectre de ces couleurs présentera des lignes obscures qui tiendront la place des rayons absorbés. Ces lignes noires conserveront toujours leurs positions relatives pour une même substance, donc elles peuvent servir à reconnaître la présence de substances colorantes dans une dissolution.

Les vapeurs métalliques présentent ce phénomène d'absorption d'une manière très-remarquable. À une température plus basse, elles absorbent toujours les rayons qu'elles émettent, lorsqu'elles sont portées à une température plus élevée. Tel est le grand principe qui a été énoncé pour la première fois par Kirchhoff, et qui lui a permis de poser les bases de le physique solaire moderne.

Les vapeurs métalliques à l'état d'incandescence flottent à la surface du soleil et forment ainsi une couche de vapeurs moins chaudes, qui exercent une absorption sélective sur la lumière, avant qu'elle arrive à nous. Les célèbres raies noires du spectre solaire, découvertes par Frauenhofer, sont dues à cette absorption sélective, et Ångström, Thalen, Kirchhoff et d'autres ont consacré beaucoup de temps et de peine à déterminer exactement le nombre et la place de toutes ces raies. Lockyer a employé récemment la photographie pour reproduire ces lignes, et le dessin du spectre solaire auquel il travaille actuellement, sera non-seulement bien plus exact que celui de ses prédécesseurs, mais fera connaître en outre un très-grand nombre de raies nouvelles.

On trouvera dans la collection des instruments exposés une grande variété de spectroscopes, ou systèmes de prismes munis de lentilles ou de lunettes convenables, pour l'observation. Quelques-uns de ces instruments ne se composent que d'un petit nombre de prismes et même d'un seul: ils sont destinés à l'analyse des rayons lumineux faibles; d'autres ont beaucoup de prismes. Dans quelques spectroscopes le rayon lumineux revient deux fois et même trois fois sur lui-même à travers les mêmes prismes. Une partie des instruments produisent une grande dispersion, d'autres ont un grand pouvoir amplifiant; toutes ces variétés peuvent avoir des avantages suivant le but qu'on se propose d'atteindre.

Il est à peine nécessaire de mentionner ici que le spectroscope est l'instrument avec lequel les plus grandes découvertes de notre temps ont été faites en chimie et dans la physique solaire. Parmi les premiers investigateurs dans l'étude des métaux par l'analyse spectrale, nous devons citer feu Sir C. Wheatstone. Plusieurs nouveaux métaux ont été découverts par Kirchhoff et Bunsen en Allemagne, et Roscoe et Crookes en Angleterre ont beaucoup ajouté à nos connaissances par l'usage qu'ils ont fait du spectroscope. Frankland, Lockyer, et d'autres en Angleterre, Janssen en France, Secchi en Italie, ont tous étudié par cette méthode les grandes questions de la physique du soleil et des autres corps

célestes : il serait impossible dans les limites de cet ouvrage de rendre justice à tous ceux qui travaillent dans le champ de la spectroscopie ; mais les travaux de Rutherford et de Draper en Amérique, de Jamin et autres en France, et des savants Anglais sur la portion la plus réfrangible du spectre solaire, étudiée par le moyen de la photographie, méritent d'être mentionnés honorablement.

Les applications pratiques de cette branche de l'optique sont encore dans l'enfance sans doute ; toutefois le spectroscope non-seulement a déjà été employé pour reconnaître la présence des métaux par les raies brillantes et celles d'autres substances par les raies d'absorption, mais encore M. Lockyer a suggéré un procédé d'analyse quantitative, par la mesure de la longueur des lignes brillantes obtenues par les vapeurs métalliques incandescentes.

On dit que la lumière est polarisée, lorsqu'elle présente certaines particularités qui ne lui sont pas habituelles. Ces particularités, quoique fort variées dans leurs manifestations, ont cependant ce trait commun, qu'elles ne peuvent pas être constatées de suite par la vue simple, et qu'il est nécessaire de recourir à des instruments spéciaux. Les phénomènes auxquels donne naissance la lumière polarisée sont parmi les plus brillants de l'optique ; mais pour être bien compris ils doivent être vus, et les appareils que nous allons décrire ont pour but de les rendre apparents. L'explication des phénomènes de la polarisation repose sur la théorie des ondulations, par laquelle on a pu, non-seulement relier les faits les plus divers, mais même dans certains cas prédire des résultats nouveaux. La théorie des ondulations consiste à admettre que la lumière résulte d'un état vibratoire des molécules de l'éther, substance qui remplit tout l'univers. Ces molécules oscillent dans un plan perpendiculaire à la direction du rayon lumineux, et les orbites qu'elles décrivent sont, tantôt une ligne droite, tantôt un cercle ou une ellipse. Dans un rayon lumineux ordinaire l'orbite décrite par la molécule d'éther subit des changements continuels et irréguliers, soit de forme, soit de position, mais dans un rayon polarisé toutes les

orbites sont semblables et semblablement situées. Polariser un rayon c'est donc imprimer à toutes les orbites des positions similaires.

Pour représenter visiblement cette portion théorique du sujet, on a imaginé divers appareils ; le plus compréhensible est la machine de Wheatstone. Cet instrument a pour but de montrer le résultat de la combinaison de diverses espèces de vibrations qui se superposent dans les diverses phases de leur mouvement. Un autre appareil pour illustrer le mouvement ondulatoire est exposé par M. Woodward de Birmingham.

Pour obtenir la polarisation rectiligne de la lumière on peut employer trois méthodes principales : 1° la réflexion par une surface de verre ou d'une autre substance non métallique ; 2° la réfraction à travers une lame de verre, ou mieux à travers une pile de lames de verre ; 3° la double réfraction. Les mêmes méthodes servent aussi pour analyser la lumière polarisée, et l'on a construit des instruments pour leur application. Le polariscope de Nörrenberg permet d'employer les deux premières méthodes ; dans d'autres appareils, c'est à la troisième que l'on a recours. Les cristaux employés pour produire la double réfraction sont la tourmaline et le spath d'Islande. La tourmaline n'a pas seulement la propriété de polariser un rayon lumineux comme tous les cristaux jouissant de la double réfraction, mais aussi d'absorber le rayon ordinaire, et par conséquent de ne laisser sortir qu'un rayon unique, ce qui est en général préférable. Le spath d'Islande donne naissance au contraire à deux rayons polarisés ; mais divers moyens ont été proposés pour n'en conserver qu'un seul : quelquefois on arrête un des rayons par un écran ; plus souvent on élimine du champ visuel l'un des rayons polarisés, au moyen de l'appareil bien connu sous le nom de prisme de Nicol. Dans l'appareil de Nörrenberg, tel qu'il est construit par Hofmann à Paris, ainsi que par Soleil, une tourmaline est employée comme polariseur et un prisme de Nicol comme analyseur.

Duboscq construit depuis plusieurs années un polariscope au

moyen duquel les diverses expériences de la polarisation sont projetées sur un écran. La construction et l'emploi de cet instrument sont plutôt difficiles, ce qui provient de la petite dimension du prisme Nicol employé ; mais maintenant on est parvenu à en faire de beaucoup plus grands qui donnent un champ lumineux de 2 à 3½ pouces de diamètre. Deux prismes de Nicol de 2¼ à 2½ pouces de champ, avec des lentilles convenables et d'autres accessoires, sont exposés. Ces prismes, construits par M. Ladd, sont en fait les premiers que l'on ait obtenus dans de telles dimensions, et ils feront époque dans les annales de la polarisation. Un autre prisme de Nicol, construit par Ahrens, est aussi exposé; il a un champ de plus de 3½ pouces et c'est le prisme le plus grand et le plus pur qui ait été obtenu jusqu'ici. A côté du prisme de Nicol, il faut citer celui de Foucault, dans lequel le second rayon est aussi éliminé du champ visuel; il est plus court que le prisme Nicol et exige moins de matière, aussi est-il plus convenable pour les expériences sur le calorique; mais pour pouvoir profiter avantageusement de tout le champ, il faut que les rayons qui le traversent soient parfaitement parallèles.

On doit au professeur Jellet un nouveau prisme analyseur au moyen duquel le plan de polarisation peut être déterminé avec une grande précision. Il consiste en un long prisme en spath d'Islande, ramené à la forme d'un prisme droit par l'usure des extrémités, et fendu dans sa longueur par un plan qui est approximativement, mais non pas tout à fait perpendiculaire à la section principale. Les deux portions dans lesquelles le prisme a été divisé sont ensuite réunies en les renversant, et un diaphragme muni d'une ouverture circulaire est placé à chaque extrémité. La lumière, qui passe à travers les deux diaphragmes, produit un champ lumineux circulaire, divisé par une fente diamétrale en deux parties, dans lesquelles les plans de polarisation sont légèrement inclinés l'un sur l'autre. Si un faisceau lumineux, préalablement polarisé rectilignement, est transmis à travers ce prisme, il sera éteint dans les deux portions du champ contiguës,

et l'éclairement sera uniforme dans une position intermédiaire. Cette position permet de déterminer avec une grande précision le plan de polarisation primitif.

La lumière de certaines parties du ciel est, comme on le sait, polarisée, et son plan de polarisation dépend de la position du soleil. C'est en se basant sur ce fait que sir Charles Wheatstone a construit une horloge solaire, dans laquelle l'angle horaire du soleil, et par conséquent l'heure locale, est approximativement déterminé par la position du plan de polarisation.

L'interférence des rayons polarisés pour toutes les différences de chemin parcouru a été étudiée expérimentalement pour la première fois par MM. Foucault et Fizeau, qui firent connaître les bandes qui se manifestent dans le spectre d'une lumière de cette espèce, après son passage à travers des plaques de cristal.

La même méthode peut être employée pour expliquer les phénomènes de coloration obtenus lorsque les plaques sont minces ; et de remarquables courbes d'interférences se manifestent dans le spectre, quand on emploie des plaques cristallines dont l'épaisseur varie. On a exposé des appareils composés d'un spectroscope et d'un polariscope, destinés à ces expériences.

Un polariscope, avec un prisme bi-réfringent comme analyseur, et pouvant tourner très-rapidement, a été inventé en même temps par le professeur Mach à Vienne et M. Spottiswoode à Londres. Ce polariscope a pour but de montrer simultanément, et non plus successivement, toutes les phases de la polarisation ordinaire ou rotatoire ; par son moyen l'observation peut se faire directement ou par projection.

On a exposé aussi un analyseur composé. Il consiste en deux ou plusieurs prismes bi-réfringents, avec des plaques de quartz interposées, et il a pour but d'étudier les combinaisons des couleurs, ainsi que les effets des couleurs dégradées, sujet traité en premier expérimentalement par Helmholtz, mais par une autre méthode. Une autre application de la polarisation rotatoire consiste à déterminer la rotation du plan de polarisation, due à une colonne

d'une longueur déterminée d'une dissolution de sucre ou d'une autre substance. Cet instrument, par lequel la richesse d'une dissolution peut être déterminée, porte le nom de saccharimètre.

Un des plus singuliers phénomènes se rattachant à la double réfraction est celui qui est connu sous le nom de réfraction conique. Ce phénomène, prévu par feu sir W. Hamilton, comme une conséquence de la théorie de l'ondulation, a été observé pour la première fois par Lloyd. Il dépend du fait que la surface de l'onde, se propageant à partir d'un point intérieur du cristal, présente certains points singuliers, ombilicaux; au fond de cette partie creuse, les tangentes se disposent suivant un cône et non pas sur un plan, tandis que sur les parties saillantes, dans le voisinage de ces ombilics, le plan tangent touche la surface suivant un anneau. Les rayons qui ont traversé le cristal, dans la direction de l'un de ces ombilics, forment un cône à leur sortie; tandis que ceux qui l'ont traversé en formant un cône, dont la base est l'un des anneaux, émergent en un cylindre de rayons parallèles. Le premier de ces cas est ce que l'on a appelé la réfraction conique externe, et le second la réfraction conique interne. Pendant longtemps l'arragonite a été exclusivement employée pour étudier la réfraction conique, mais récemment M. Nodot a montré que les cristaux de sucre, de bichromate de potasse et d'acide tartrique atteignent également bien le but.

Quelques substances possèdent la propriété, observée pour la première fois par le professeur G. Stokes, de changer en apparence la couleur d'un rayon lumineux, ou plus exactement de modifier la longueur des ondulations des rayons qu'elles reçoivent. En général, la nouvelle couleur produite est d'une réfrangibilité moins grande que celle des rayons incidents. L'urane, qui est souvent employé dans la fabrication du verre, donne ainsi une couleur jaune canari, le sulfate de quinine et l'esculine en dissolution produisent une couleur bleue. Ces substances sont de celles qui ont été étudiées en premier lieu; mais d'autres présentent la même

propriété. La fluorescence a été employée pour étudier la portion ultra-violette du spectre.

Les remarquables expériences de M. Crookes sur la force répulsive, qui accompagne la radiation d'un corps léger suspendu librement dans un espace vide, ont suggéré une nouvelle méthode pour mesurer le pouvoir de radiation d'un corps, à laquelle on a donné le nom de radiométrie. Les principaux faits constatés sont les suivants. Si un rayon de lumière tombe sur un corps léger suspendu dans un milieu où le vide n'a été fait que partiellement, le corps est attiré ; ce fait était déjà connu, et il est attribué à des courants de convection. Dans un vide plus avancé l'attraction diminue et finit par cesser. Si le vide est poussé encore plus loin, il y a alors répulsion, et pour obtenir ce résultat il faut se servir de la pompe de Sprengel. La force répulsive varie d'intensité avec la couleur et la nature du corps suspendu, et aussi avec la longueur d'ondulation du rayon lumineux qui l'éclaire. On a exposé des radiomètres de formes variées.

Après la polarisation, la branche de l'optique la plus importante pour l'étude de la nature et des propriétés de la lumière est celle des interférences et de la diffraction, qui donnent un moyen de mesurer la longueur des ondulations des divers rayons. Le sens exact du terme ondulation ne sera connu, que lorsque la physique moléculaire sera plus avancée, mais quelle que soit sa réponse, il n'en est pas moins certain que les phénomènes lumineux sont périodiques, soit relativement au temps, soit relativement à l'espace, et la théorie de l'ondulation est la seule théorie qui ait résisté à l'épreuve de l'expérience. L'expérience fondamentale qui consiste à produire les interférences, en réunissant ensemble deux rayons lumineux au moyen de deux miroirs légèrement inclinés l'un sur l'autre, est le point de départ de cette portion de l'optique. Comme complément on doit citer l'expérience correspondante faite avec le bi-prisme. Cet instrument consiste en une plaque de verre dont un des côtés est plan, et l'autre consiste en deux surfaces inclinées l'une par rapport à l'autre comme un toit très-aplati.

Avec ces deux instruments la lumière, qui réellement provient d'un seul point lumineux, paraît venir de deux points très-rapprochés l'un de l'autre. On obtient ainsi la superposition de deux rayons dont les ondulations sont dans la même phase, ce qui est essentiel pour obtenir les phénomènes d'interférence. L'expérience se fait mieux avec les bi-prismes qu'avec les miroirs, mais le calcul des longueurs d'ondulation est plus long.

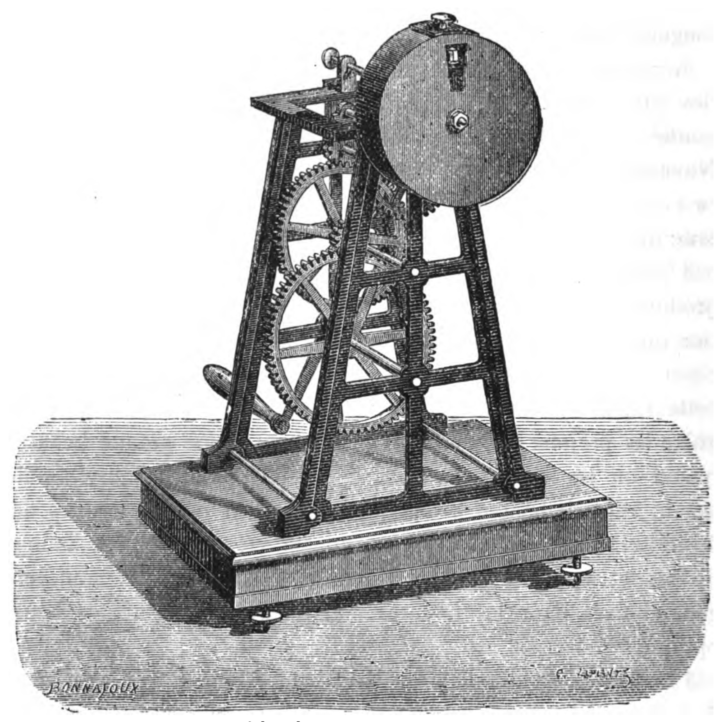
À ce sujet se rattache intimément le phénomène des couleurs des lames minces, signalé pour la première fois par Boyle, puis étudié par Hooke, et d'une manière beaucoup plus complète par Newton. L'instrument nécessaire pour faire les expériences sur ce sujet consiste en deux plaques de verre qu'on peut comprimer avec des vis, et on le trouve dans tous les laboratoires.

L'interférence de rayons émanant de la même source peut se produire aussi au moyen de la diffraction, c'est-à-dire de la déviation qu'éprouvent les rayons dans leur passage près des bords d'un objet nettement limité. Les apparences optiques obtenues par cette méthode sont de petites dimensions, en sorte qu'on ne peut guère les projeter; elles sont certainement d'une grande beauté, quand on les observe à l'aide d'un appareil bien ajusté, consistant essentiellement en écrans présentant des ouvertures de formes et de dimensions variées, montés sur des supports munis de vis et pouvant prendre diverses positions. Ils sont en général fixés dans les rainures d'un cadre de fer, appelé banc optique.

Les figures de diffraction varient naturellement avec la nature des ouvertures qui laissent passer la lumière; elles ont été le sujet de beaucoup de travaux mathématiques. Bridge, à qui l'on doit la découverte d'un certain nombre de théorèmes généraux, a inventé un appareil très-ingénieux, muni d'ouvertures photographiées sur une plaque de verre, et au moyen duquel on peut facilement obtenir de très-belles images.

Dans un cas particulier de diffraction on emploie des plaques de verre couvertes de fines rayures ou stries; on leur donne le nom

de *réseaux*, et elles ont une importance toute spéciale. Ces stries sont quelquefois obtenues en rayant une couche d'argent déposée sur le verre. Lord Rayleigh a réussi à obtenir des réseaux photographiés pour un prix relativement peu élevé. Le nombre des stries varie de deux à six mille, et même plus, dans



Phosphoroscope de Becquerel.

un pouce. Lorsque la lumière qu'on laisse arriver par une fente étroite tombe sur un de ces réseaux, il se forme un spectre, ou plutôt une série de spectres, de dimensions croissantes, situés à droite et à gauche du centre. Les deux ou trois premiers spectres sont passablement distincts, mais les autres se superposent les uns aux autres et ils ne peuvent être distingués que par le moyen

des raies de Fraunhofer, ou par quelques autres raies déterminées. Les spectres obtenus par les réseaux sont appelés normaux, parce que les divers rayons ne sont pas inégalement dispersés comme avec les prismes. Ces spectres ont été fort employés pour déterminer les longueurs des ondulations par Ångström, Thalen, et autres.

Les effets lumineux mentionnés jusqu'ici, sauf ceux produits par la photographie, ne se manifestent que tant que les rayons lumineux sont présents; mais quelques corps ont la propriété de retenir pendant un certain temps les rayons lumineux qu'ils ont reçus et de les émettre de nouveau. C'est le phénomène connu sous le nom de phosphorescence. Un grand nombre de substances présentent cette propriété, mais plusieurs ne la possèdent que pendant un temps excessivement court, une très-petite fraction de seconde. M. E. Becquerel, qui a fait une étude spéciale de ces phénomènes, a construit un phosphoroscope au moyen duquel on peut mesurer cette courte persistance. La phosphorescence et la fluorescence sont des phénomènes très-voisins, et la lumière électrique qui est très-riche en rayons violets est excellente pour ces expériences. On prépare actuellement des sulfures de calcium, de barium, etc., qui donnent de magnifiques résultats.

Wm. Spottiswoode.

II.—Procédés d'Impression Photographique.

La lumière blanche, et certains rayons colorés, ont le pouvoir de réduire en éléments plus simples les molécules de diverses substances.

Dans quelques cas la modification ne se produit qu'à la suite d'une exposition prolongée à la lumière; c'est ce qui a lieu pour certains verres et pour les couleurs d'aniline; l'action se manifeste très-rapidement au contraire, avec d'autres substances dont on se sert en photographie.

Les corps qui sont le plus généralement connus pour leur sensibilité à l'action de la lumière sont les combinaisons de l'argent, telles que l'iodure ou le chlorure, ainsi que des sels organiques plus complexes.

La lumière transforme ces substances en d'autres plus simples et, en la faisant passer par une lentille ou au travers d'un négatif photographique, on peut obtenir un dessin fait entièrement avec de l'argent métallique.

Les premières photographies connues, celles de Wedgewood, ont été obtenues avec du chlorure d'argent. Sir John Herschel, entre autres expérimentateurs, opérait avec du chlorure d'argent, en laissant dans certains cas déposer un fin précipité de ce sel sur du verre. Après avoir lavé ce dépôt avec une solution diluée de nitrate d'argent et l'avoir fait sécher, il exposait la couche sensible à la chambre obscure. L'image du télescope de quarante pieds, exposée à South Kensington, est la première photographie connue faite sur verre, et elle date de 1839. Postérieurement aux essais de Wedgewood, Niecphore de Niepce découvrit que le bitume de Judée, ou asphalte, devient insoluble dans ses dissolvants habituels, lorsqu'il a été exposé à la lumière. Une vue de l'église de Kew, obtenue ainsi à la chambre obscure en 1824, est conservée au British Museum. Cette découverte de Niepce

est encore utilisée dans certains procédés de gravure photographique, et quoique le procédé soit lent, les images que l'on obtient ont certaines qualités de la plus haute valeur. Dans ces dernières années, ce que l'on appelle à tort le procédé de reproduction au charbon a été beaucoup employé par les photographes. Lorsqu'on mélange la dissolution d'un bichromate alcalin avec certains composés organiques, comme la gélatine ou la gomme, puis qu'on la laisse sécher et qu'on l'expose ensuite à la lumière, il se produit une singulière transformation ; le sel de chrome cède une partie de son oxygène au corps organique, et le nouveau composé ainsi formé devient insoluble dans l'eau. En imbibant du papier avec un mélange de gélatine, d'un pigment coloré quelconque et de bichromate de potasse, puis en le plaçant au dessous d'un négatif ordinaire, la gélatine devient insoluble à une profondeur dépendant de l'intensité de la lumière qui a passé à travers les diverses parties du négatif, et presque toute la surface de la gélatine du côté du verre devient insoluble. Si le papier ainsi préparé, après avoir été exposé à la lumière, était placé dans de l'eau chaude, la gélatine soluble, emprisonnée entre le papier et la pellicule extérieure qui est insoluble, ne pourrait pas être enlevée ; il est donc nécessaire de recourir à un artifice pour que l'image puisse se développer. Il consiste à faire adhérer la pellicule à un support temporaire, à placer le tout dans l'eau et à enlever ensuite le papier. Toute la gélatine qui est restée soluble peut donc être éliminée par le lavage, et l'image se développe complètement. Lorsque l'opération est terminée, l'image peut être transportée de nouveau sur du papier ou laissée sur le support ; dans ce dernier cas, pour obtenir un dessin dans sa position normale, on doit employer un négatif renversé. Dans ce procédé de reproduction, l'image est formée avec de la gélatine, et son intensité dépend beaucoup de la nature du pigment qu'elle contient. Le procédé autotype est un exemple de ce mode d'impression par la photographie. Si une image formée par de la gélatine est déposée sur une mince pellicule homogène, on peut

en prendre l'empreinte sur une surface métallique malléable en les comprimant fortement l'une contre l'autre. Un liquide gélatineux coloré est alors versé sur le moule ainsi obtenu, puis du papier étendu sur une plaque dure et parfaitement plate est placé dessus ; en pressant légèrement, on fait sortir l'excès de matière colorante. Le papier peut ensuite être enlevé et il emporte avec lui tout le dépôt de gélatine colorée qui remplissait le creux du moule. Telle est la description succincte du procédé Woodbury, dont l'Exposition contient des spécimens, avec couches de gélatine et moules.

Dans ces dernières années, on a donné une nouvelle extension à cette action des bichromates alcalins sur la gélatine. La gélatine ne devient pas seulement insoluble sous l'influence de la lumière, mais encore elle perd sa faculté d'absorber l'eau. On a profité de ce fait pour préparer des surfaces au moyen desquelles on peut imprimer avec de l'encre d'imprimerie sur une presse lithographique ordinaire. Si l'on expose à l'action de la lumière, au travers d'un négatif, une lame de verre revêtue d'une couche de gélatine et de bichromate de potasse (avec addition, soit d'une gomme résine, soit d'alun de chrome, pour donner de la dureté à la substance), les diverses portions de la pellicule gélatineuse présentent la faculté d'absorber l'eau proportionnellement à l'intensité de la lumière qui a agi sur le négatif. On plonge ensuite la surface dans l'eau froide pendant un moment, puis on enlève l'excès d'eau, et l'on passe sur la gélatine un rouleau mou, imbibé d'encre grasse, qui adhère complètement aux seules parties qui ont été impressionnées par la lumière, et les diverses ombres du dessin seront formées par les diverses proportions d'encre que la pellicule gélatineuse sera susceptible de retenir, capacité qui dépend de l'intensité de la lumière et du degré d'absorption d'eau qui en est la conséquence. L'image ainsi obtenue avec de l'encre grasse, on peut placer sur la presse lithographique la pellicule gélatineuse (supportée sur la plaque primitive de verre ou sur une plaque de métal) et en tirer l'épreuve sur papier. En humectant de nouveau la surface et

en la passant au rouleau on obtiendra d'autres épreuves. Les procédés mécaniques connus sous le nom de Albertype, Héliotype, Pantotype, et Autotype ne sont que des modifications du même procédé.

La photo-lithographie est aussi une application de l'action de la lumière sur la gélatine bichromatée. Par exemple on passe du papier à la gélatine ; on l'expose à la lumière, puis on enlève par un lavage la gélatine qui n'a pas été impressionnée ; ensuite la surface entière de la pellicule est passée à l'encre grasse qui est retenue par les parties de la gélatine altérées par la lumière. Le transfert, c'est le nom qu'on donne à cette épreuve, est placé sur une pierre lithographique, et soumis à la presse ; le tirage se fait ensuite par les procédés usuels de la lithographie.

Lorsque du papier est imbibé avec un bichromate alcalin, puis séché et soumis à la vapeur d'aniline, il se colore en noir ; mais lorsque la lumière a réduit le sel chromique, la surface reste sans changement. Le procédé à l'aniline de Willis est basé sur cette propriété. On place une carte ou un plan sur le papier sensible et, après l'avoir exposé à la lumière, on le soumet à la vapeur d'aniline. On obtient ainsi immédiatement une épreuve positive, sans être obligé de recourir à un négatif.

Il y a plusieurs procédés pour obtenir par photographie un relief qui peut servir à l'impression. Un des meilleurs moyens consiste à exposer une plaque de zinc recouverte de bitume de Judée sous un négatif, puis de dissoudre les portions non altérées par la lumière. Le zinc mis à nu est traité par un acide et, moyennant certaines précautions, il est rongé assez profondément pour qu'on puisse en tirer des épreuves comme avec une gravure sur bois. Le procédé de Gillot pour la photographie en relief est aussi très-bon.

Il y a d'autres composés métalliques et organiques qui sont modifiés par la lumière. Les sels de sesquioxyde de fer et d'urane sont plus ou moins réduits à l'état de sels de protoxyde, en présence d'une matière organique comme le papier et la géla-

tine. On a exposé quelques spécimens des premières épreuves obtenues par ce moyen.

Le procédé polychrome de Vidal est un procédé au charbon. On prend d'abord un négatif du sujet; on en tire quelques épreuves, négatives également, et dont le nombre dépend du nombre de couleurs que l'ont veut obtenir. Si on désire que quelque portion du dessin ait une teinte particulière, on prend un des négatifs, dont on recouvre d'un vernis opaque toutes les diverses parties, sauf celles qui doivent prendre la teinte voulue. On fait une épreuve à la gélatine pour cette teinte; puis, à l'aide d'un système de repères, on la place dans la position exactement convenable sur un dessin entier, qui au préalable a été coloré d'une teinte neutre ou colorée servant de fond. En répétant l'opération pour les diverses teintes, on superpose les couches de couleurs transparentes l'une après l'autre, jusqu'à ce que le dessin polychrome ait été obtenu. Ce procédé est analogue à celui de la chromolithographie.

W. DE W. ABNEY.

INSTRUMENTS EMPLOYÉS DANS L'ÉTUDE DE LA CHALEUR.

LES diverses branches de la Physique sont si intimément unies, et dans l'étude de chacune d'elles, on a un tel besoin de recourir aux autres, qu'il est à peine possible de les classer sans se répéter souvent. Mais la difficulté devient encore bien plus grande si l'on cherche à séparer les diverses subdivisions d'une branche particulière. Nous ne voulons donc point essayer de tracer des lignes de démarcation précises et catégoriques, et nous préférons quelques répétitions, qui seront probablement utiles, plutôt que de tenter en vain une classification en chapitres complètement indépendants les uns des autres.

Ceci étant bien compris, nous pouvons diviser notre sujet de la manière suivante :

I. Nature de la chaleur.
II. Effets de la chaleur.
III. Mesure de la chaleur et de la température.
IV. Sources de chaleur.
V. Transmission de la chaleur.
VI. Transformations de la chaleur.

On remarquera que les groupes I., IV. et VI. ont une grande analogie entre eux et se rapportent à des sujets récemment ajoutés

à nos connaissances. Le groupe III. dépend, au moins au point de vue pratique, des phénomènes compris sous le No. II. Reprenons maintenant ces divers sujets.

I.—Nature de la Chaleur.

Ce que nous appelons maintenant une transformation de l'énergie mécanique en chaleur, a été effectué depuis les temps les plus anciens par les sauvages pour se procurer du feu à l'aide du frottement. L'inverse, c'est-à-dire la transformation de la chaleur en mouvement, date au moins de l'époque de Héron. Mais savoir qu'on peut obtenir un certain résultat d'une certaine manière, n'implique pas nécessairement que l'on comprenne le "Pourquoi," et Héron, en faisant fonctionner son éolipyle, ne pensait pas plus à transformer de la chaleur en travail, que le sauvage à transformer du travail en chaleur.

La chaleur n'est qu'une des formes de ce que l'on appelle maintenant Énergie : c'est ce qui a été à peu près établi par Rumford et Davy à la fin du dernier siècle ; mais c'est seulement en 1812 que Davy posa clairement ce principe. Les observations de Rumford, sur la quantité de chaleur obtenue par la perforation d'un canon, l'avaient conduit à une estimation de l'équivalent mécanique de la chaleur de 20 °/₀ supérieure au véritable chiffre.

Les expériences étendues et excessivement précises de Joule, en 1843 et dans les années suivantes, par des procédés dépendant directement du frottement, l'ont conduit à exprimer l'équivalent mécanique d'une unité de chaleur de l'échelle Fahrenheit par un nombre de pied-livres variant entre 770 et 774. Le chiffre finalement assigné par Joule (pour la latitude de Manchester) est 772 et ne comporte certainement pas une erreur de 1 °/₀. (En mesures françaises 423,5 kilogrammètres par calorie.)

En 1853 Joule vérifia ce résultat en déterminant avec le plus grand soin la chaleur spécifique de l'air, et une expérience directe faite en 1845 a montré que la chaleur développée par la brusque

compression de l'air est presque exactement équivalente au travail dépensé.

Des mesures directes de la chaleur produite par une dépense de travail mécanique ont été obtenues de différentes manières par Colding en 1843, et ont été répétées sous diverses formes par Hirn, Regnault, etc., depuis la publication (en 1849) du résultat définitif obtenu par Joule.

La vérification directe du fait, que de la chaleur disparaît lorsqu'une machine à feu engendre du travail, vainement tentée par Séguin en 1839, fut effectuée pour la première fois par Hirn en 1857.

Divers expérimentateurs ont réussi à déterminer la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur par une grande variété de méthodes indirectes dans ces trente dernières années. Les plus anciennes mesures sont celles de Joule faites en 1843 et dans les années suivantes par le moyen de machines magnéto-électriques. Les résultats de toutes ces expériences peuvent être résumés brièvement de la manière suivante dans l'énoncé de la—

Première Loi de la Thermodynamique.

Quand des quantités égales de travail mécanique sont produites à l'aide d'un moyen quelconque, par des sources purement thermiques, ou converties en effets thermiques uniquement, il disparaît ou il se dégage des quantités égales de chaleur. Et, à la latitude de Manchester, 772 pied-livres de travail sont capables d'élever la température d'une livre d'eau de 50° à 51° Fahrenheit.

Aucun fait physique peut-être n'a plus simplifié la science, et n'a mis sur la voie de plus singulières et plus nouvelles prévisions (vérifiées plus tard par l'expérience) que l'idée du *Cycle* de Carnot, et son idée subséquente du *Cycle réversible.* Elle nous a donné la possibilité, non-seulement de trouver la relation qui existe entre le travail et la chaleur dans une machine à feu, mais aussi d'apprécier exactement le degré de perfection d'une machine

de cette nature; elle nous a permis d'obtenir une définition absolue de la température, de prévoir l'action de la pression sur la fusion des solides, et les conséquences innombrables découlant des relations existant entre la matière et l'énergie. Ces conséquences sont renfermées dans la—

SECONDE LOI DE LA THERMODYNAMIQUE:

Si l'on a une machine telle que, lorsqu'on la fait marcher d'un mouvement renversé, tous les effets physiques et mécaniques soient aussi renversés dans toutes les périodes du mouvement, cette machine produit autant de travail mécanique qu'il est possible de le faire par un moteur thermodynamique quelconque au moyen d'une quantité donnée de chaleur, fonctionnant entre des températures identiques de la source et du refrigérant.

On doit observer que la *réversibilité* est le seul critère permettant de constater exactement la perfection d'une machine. Aussi dans le travail d'une machine à feu réversible on ne se préoccupe point de la nature de la substance qui travaille; les températures de la source et du refrigérant et la quantité de chaleur fournie sont les seuls facteurs servant à déterminer le travail qui peut être engendré. On ne saurait trop insister sur l'importance de cette loi à l'égard des machines actuelles et de celles qui seront construites dans l'avenir.

II.—EFFETS DE LA CHALEUR.

Les effets de la chaleur sont si nombreux que nous ne pouvons énumérer que les plus importants. La plus grande partie de l'énergie qui se trouve à notre disposition provient en fait de la radiation solaire ancienne et actuelle. La lumière elle-même n'est aussi qu'une forme particulière de la chaleur rayonnante, que nous nous bornerons à signaler dans ce chapitre. Sans la somme d'énergie que le soleil nous fournit actuellement, ou qu'il a fournie dans les temps antérieurs, notre stock de force ne consiste-

rait que dans les marées, dans la chaleur centrale terrestre et dans l'énergie potentielle des corps simples, tels que le fer natif, le soufre natif, etc. L'énergie des marées seules pourrait donner des résultats importants; mais jusqu'à présent elle n'a point été utilisée sur une échelle un peu considérable à notre connaissance.

Nous pouvons classer les effets de la chaleur de la manière suivante:—

(*a*) Changements dans les dimensions et l'élasticité des solides, dans le volume ou la force élastique des fluides.
(*b*) Changements dans l'état moléculaire.
(*c*) Changements de température.
(*d*) Effets électriques.
(*e*) Changements chimiques.

Reprenons ces divers points.

(*a*) CHANGEMENTS DANS LES DIMENSIONS ET L'ÉLASTICITÉ DES SOLIDES, DANS LE VOLUME OU LA FORCE ÉLASTIQUE DES FLUIDES.

En règle générale les corps augmentent de volume par la chaleur, mais il existe plusieurs exceptions remarquables. Il est très-important par conséquent de connaître les lois de l'expansion, car elles jouent un rôle considérable au point de vue scientifique dans l'appréciation des températures ainsi que dans un grand nombre de cas pratiques.

On appelle coefficient de dilatation linéaire d'un solide, à une température donnée, l'accroissement proportionnel de la longueur d'un corps pour une élévation de température d'un degré. Dans les corps isotropes comme le verre, le plomb, etc., ce coefficient est le même dans tous les sens. Dans ceux qui ne sont pas isotropes comme le bois, le fer fibreux et les substances cristallisées autres que celles du système cubique, le coefficient à des valeurs différentes dans des directions différentes qui peuvent toutefois se ramener à trois directions perpendiculaires les unes aux autres.

Il peut se produire une expansion dans une ou deux de ces directions, et une contraction dans les autres, ou dans l'autre. Il en résulte qu'on peut trouver dans un corps une ligne intermédiaire suivant laquelle aucun changement de longueur ne se produit. Ce fait a été signalé, il y a déjà longtemps, par Brewster, qui voulait l'utiliser pour construire un pendule d'une longueur invariable. L'exacte détermination de la dilatation des solides par la chaleur est absolument nécessaire pour la comparaison des étalons de longueur, pour la mesure des bases de la triangulation, pour la construction des pendules à compensation, et pour beaucoup de recherches des plus délicates de la physique.

Instruments pour déterminer le coefficient de dilatation linéaire d'un solide dans toutes ses directions. [Roy, Ramsden, Lavoisier et Laplace, Fizeau, etc.]

Le coefficient de dilatation cubique d'un solide est la somme de ses trois principaux coefficients de dilatation linéaire. Dans un corps isotrope il est donc le triple du coefficient de dilatation linéaire.

Instruments pour mesurer le coefficient de dilatation *apparente* et ensuite le coefficient de dilatation *absolue* des liquides.

Pour mesurer le volume des liquides, il faut les renfermer dans des vases solides dont les dimensions se modifient elles-mêmes par la chaleur; la détermination de la dilatation absolue d'un liquide nécessite donc la connaissance de la dilatation cubique du vase qui le contient.

La force élastique du *gaz parfait idéal* à volume constant est proportionnelle à la température absolue. Il y a divers procédés pour mesurer la force élastique d'un gaz dont le volume reste constant à des températures indiquées par les thermomètres ordinaires.

Coefficient de dilatation cubique d'un gaz à pression constante. [Rudberg, Magnus, Regnault, etc.]

Contraction par la chaleur du caoutchouc étiré, de l'eau entre o et 4 degrés C., du iodure d'argent et d'autres corps anomaux.

(*b*) CHANGEMENTS DANS L'ÉTAT MOLÉCULAIRE.

On emploie généralement la chaleur pour liquéfier, réduire en vapeur et dissocier les éléments constitutifs des corps ; mais la compression peut dans certaines circonstances produire des effets analogues très-singuliers.

FUSION DES SOLIDES.

La pression restant la même, chaque solide a un point de fusion fixe, et (pourvu que la masse soit agitée) quelle que soit la vitesse avec laquelle la chaleur est appliquée, la température de la totalité de la substance reste à ce point de fusion, jusqu'à ce que la dernière particule soit fondue.

Cette loi est une de celles qui sont à la base de la théorie de Black sur la *chaleur latente*. La notion moderne que la chaleur n'est pas une matière, nous conduit à considérer l'énergie qui cesse d'être sensible au thermomètre, comme employée à séparer les molécules du corps solide. Mais la première condition de cette proposition conduit à l'importante question de l'influence de la pression sur le point de fusion. Elle fut discutée d'abord par James Thomson en 1849, et ses calculs relatifs à l'abaissement du point de fusion de la glace par la pression, furent exactement vérifiés expérimentalement par sir W. Thomson dans la même année. Hopkins, Bunsen et autres, ont étendu cette vérification expérimentale à l'élévation du point de fusion des substances qui augmentent de volume en devenant liquides.

A ce sujet se rattachent les curieux phénomènes du regel, etc., et la théorie du mouvement des glaciers. [Forbes, Faraday, Dolfuss-Aussett, J. Thomson, etc.]

ÉVAPORATION DES LIQUIDES.

La pression restant la même, il y a un point fixe d'ébullition pour la surface libre de chaque liquide, et (pourvu que la masse soit agitée) de quelque manière que la chaleur soit appliquée, la tempéra-

ture de la totalité du liquide reste au point fixe d'ébullition, jusqu'à ce que les dernières particules aient été vaporisées.

Les effets de la pression sur le point d'ébullition peuvent être calculés comme ceux de la pression sur le point de fusion ; mais comme nous ne connaissons pas une substance qui (à la même température et à la même pression) occupe un moindre volume à l'état de vapeur qu'à l'état liquide, nous pouvons affirmer dans tous les cas que la pression a pour effet d'élever le point d'ébullition.

Le point d'ébullition de l'eau a été employé pour remplacer le baromètre comme dans le thermomètre hypsométrique. [Wollaston.]

D'autres instruments basés sur ces principes sont la marmite de Papin, le cryophore, les hygromètres de Daniell et de Regnault, etc.

Effets simultanés de la pression et de la température sur les fluides.

Liquéfaction des gaz par le froid ou la pression, ou par le froid combiné avec la pression. [Faraday, Thilorier, Natterer, etc.]

L'expérience de Cagniard de la Tour.

Découverte par Andrews de la *température critique* et de la continuité des états liquide et gazeux.

Explication de la non liquéfaction de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'azote, de l'oxyde de carbone et du gaz des marais.

Modification de la température critique par l'introduction d'un gaz non liquéfiable. [Andrews.]

Appareils pour la mesure de la chaleur latente. [Black, Crawford, Irving, Regnault, etc.]

(*c*) CHANGEMENTS DE TEMPÉRATURE.

Chaleur spécifique.

Diverses formes de calorimètres. [Black, Wilke, Regnault, Bunsen, etc.]

Chaleur spécifique de l'air et des autres gaz à volume constant et à pression constante.

Méthodes de Joule et de Regnault.

Vitesse du son.

Sons rendus par les tuyaux d'orgue avec différents gaz.

(*d*) Effets électriques.

Électricité produite en chauffant des cristaux, etc. [Haüy, Hankel, Thomson, etc.]

Courants électriques obtenus par le réchauffement inégal d'un circuit non homogène. Thermo-électricité.

Lorsqu'un circuit est formé de deux métaux, et que l'un des points de soudure est chauffé à une plus haute température que l'autre, il se produit dans le circuit un courant électrique dont l'intensité augmente avec la différence entre les températures des deux points de soudure. Le sens du courant est naturellement renversé si la soudure primitivement froide devient la plus chaude. [Seebeck.]

Dans certains cas, comme dans les circuits fer-cuivre, fer-argent, fer-or, le courant augmente de plus en plus lentement pour des accroissements égaux de température des points de soudure; l'intensité du courant atteint un maximum, puis il diminue, et enfin il change de direction. [Cumming.]

Lorsqu'un courant électrique provenant d'une source externe, passe à travers la jonction de deux métaux, il se produit une absorption ou un dégagement de chaleur. Si la direction du courant est la même que celle du courant qui aurait été produit par le réchauffement du point de soudure, il y a absorption de chaleur. [Peltier.]

Thomson a montré théoriquement que l'expérience de Peltier est insuffisante pour expliquer les phénomènes découverts par Cumming, et qu'un courant d'électricité passant dans un conducteur inégalement chauffé, doit en général déterminer une absorption ou un dégagement de chaleur, suivant qu'il passe de la portion chaude à la portion froide, ou inversément. Il a vérifié expérimentalement que cette *convection* électrique de chaleur est

positive dans le cuivre et négative dans le fer. Le Roux à fait depuis lors de bonnes déterminations de cette quantité.

Tous les phénomènes des courants thermo-électriques peuvent être représentés graphiquement par le moyen du diagramme thermo-électrique de Thomson. Lorsqu'on construit ces courbes d'après les données de l'expérience, on constate que les lignes représentant (en température absolue) la *position* thermo-électrique d'un métal, sont approximativement droites, au moins pour des températures variant dans les limites d'un thermomètre à mercure. Le nickel et le fer, deux substances fortement magnétiques, présentent néanmoins une exception bien marquée. Ces substances donnent une ligne brisée : le nickel change de signe à 200° C., et de nouveau à 320° C. ; le fer, à la température rouge sombre et ensuite à la température blanche. Avec le fer, et certaines variétés de platine dans lesquelles il n'y a pas de convection électrique, on peut produire un courant thermo-électrique dû entièrement à la convection électrique dans le fer seul.

III.—Mesure de la Chaleur et de la Température.

La mesure de la température absolue dépend du cycle de Carnot, et elle est en fait comprise dans la seconde loi de la thermodynamique. Pour arriver à ce que la mesure de la température absolue coïncide autant que possible avec les indications du thermomètre à air, W. Thomson définit le rapport des températures absolues de la source et du réfrigérant dans une machine à feu parfaite, comme égal au rapport de la chaleur prise à la source à la chaleur déversée dans le réfrigérant. La détermination actuelle du zéro absolu (c'est-à-dire de la température d'un corps totalement privé de chaleur) et des températures absolues correspondantes aux indications d'un thermomètre particulier, nécessite donc des expériences faites dans des conditions se rapprochant autant que possible de celles d'une machine à feu parfaite. Mais ceci trouvera mieux sa place dans le § VI.

Pratiquement, les températures sont mesurées au moyen de thermomètres, et il n'y a pas de difficulté à transformer leurs indications en degrés de l'échelle des températures absolues. Ce dont on a besoin dans un travail pratique, c'est de quelque chose de facile à employer et de facile à reproduire. Lorsqu'on veut atteindre une grande exactitude scientifique, il est nécessaire de ramener les indications des instruments aux températures absolues correspondantes.

Thermomètres.

Il paraît maintenant certain que le premier inventeur du thermomètre fut Galilée avant 1597 (voir "Mémoire sur la Détermination de l'Échelle du Thermomètre de l'Académie del Cimento," par G. Libri, *Annales de Chimie*, xlv. 1830). Son thermomètre était un thermomètre à air, consistant en une boule soufflée à l'extrémité d'un tube plongeant dans un vase plein de liquide. Le premier emploi de cet instrument fut la détermination de la température du corps humain. Le patient mettait la boule dans la bouche, l'air se dilatant par la chaleur faisait descendre le liquide renfermé dans le tube et, de la hauteur à laquelle le liquide se maintenait finalement, le médecin pouvait conclure si le malade avait ou non la fièvre.

Un instrument analogue fut employé plus tard dans le même but par le médecin Sagredo qui, jusqu'à ces derniers temps, a été considéré comme l'inventeur du thermomètre.

Les thermomètres à air sont affectés, aussi bien par les variations de la pression atmosphérique, que par les modifications de température de l'air qu'ils renferment ; aussi leurs indications n'ont pas de valeur, si l'on n'élimine pas cette influence perturbatrice, ou si l'on n'en tient pas compte.

Des thermomètres formés d'un liquide renfermé dans un tube de verre hermétiquement clos, furent construits pour la première fois d'après les indications de Rinieri (mort en 1647) par Joseph Moriani, qui avait été surnommé *Il Gonfia* à cause de sa grande habileté à souffler le verre.

Plusieurs des travaux publiés par Rinieri se trouvent dans les Mémoires de l'Académie del Cimento ; mais pendant longtemps ils ont été considérés comme n'ayant plus de valeur, car les indications thermométriques n'étaient pas comparables à nos échelles actuelles.

En 1829, cependant, un certain nombre des thermomètres de Rinieri furent retrouvés par Antinori, et l'on a pu comparer leur graduation avec celle du thermomètre Réaumur, ce qui permet maintenant de traduire les observations de Rinieri.

Les Académiciens de Florence firent usage du thermomètre pour déterminer si la glace fond toujours à la même température, et leurs recherches sur ce sujet leur permirent finalement de répondre affirmativement.

Newton fit faire ensuite un grand pas à la thermométrie dans sa "Scala graduum Caloris," qui parut dans les Philosophical Transactions de 1701. Il proposa de prendre comme températures fixes celle de la glace fondante et celle de l'eau bouillante.

Fahrenheit de Danzig, vers 1714, construisit le premier des thermomètres dans lesquels la graduation était uniforme. On s'est beaucoup servi de ces thermomètres en Angleterre, et la graduation Fahrenheit est encore très-répandue dans tous les pays de langue anglaise. Dans le thermomètre Fahrenheit, la température de la glace fondante correspond à 32°, et celle de l'eau bouillante à 212°.

La graduation centigrade a été introduite par Celsius d'Upsal. Le point de congélation correspond à 0°, et le point d'ébullition à 100°. La simplicité de ce mode de graduation a fait accepter ce thermomètre, avec le système décimal français, par les hommes de science, surtout sur le Continent.

La graduation Réaumur, dans laquelle la température de la glace fondante correspond à 0° et celle de l'eau bouillante à 80°, est encore employée sur le Continent par quelques médecins et dans les usages de la vie domestique.

La différence de ces trois graduations thermométriques donne

un exemple frappant des inconvénients d'un manque d'uniformité dans les systèmes de mesures.

Les thermomètres dont nous avons parlé jusqu'à présent sont fondés sur la différence de dilatation qui existe entre les liquides ou les gaz, et les vases qui les renferment. D'autres thermomètres sont fondés sur la différence de dilatation des solides. Le thermomètre de Breguet consiste en une lame mince composée de trois couches métalliques : argent, or et platine. Cette lame est enroulée en spirale, l'argent étant en dehors. Lorsque la température s'élève, l'argent se dilate plus que l'or et ce dernier plus que le platine, aussi la spirale se resserre-t-elle. Si la température s'abaisse, on obtient un résultat inverse. L'extrémité inférieure de l'hélice porte une aiguille qui indique la rotation. Ce thermomètre, vu sa très-petite masse, accuse très-promptement des variations de température même très-faibles.

D'autres thermomètres sont fondés sur des phénomènes électriques.

Le courant thermo-électrique fut découvert par Seebeck en 1822, et la première pile thermo-électrique dans laquelle la force électro-motrice du courant était multipliée, fut construite par Œrsted et Fourier. C'est toutefois à Nobili qu'on doit la construction d'une thermo-pile assez sensible pour être employée à la mesure des variations excessivement faibles de température, celles par exemple que produit la chaleur rayonnante.

Un autre moyen de mesurer la température par l'électricité est basé sur la diminution de la conductibilité électrique des métaux lorsque leur température s'accroît. C'est sur ce principe qu'est construit le thermomètre à résistance de Siemens, particulièrement applicable à la détermination de la température en des places difficilement accessibles, comme le fond de la mer.

Un fil de platine, présentant une grande résistance au passage de l'électricité, est placé, dans une boîte fermée, dans le lieu dont on doit observer la température, et il est relié par un gros fil de cuivre avec l'endroit où se trouve placé l'observateur. Un fil

semblable placé dans aussi une boîte fermée, plongée dans une caisse pleine d'eau, est disposé de manière que les résistances électriques des deux fils puissent se comparer. L'eau du vase est alors chauffée ou refroidie jusqu'à ce que la résistance du fil qui y est immergé soit égale à celle du fil de platine de la station éloignée. Les températures des deux fils doivent donc être égales à cet instant, et en observant avec un thermomètre la température de l'eau du vase, on obtient celle de l'autre station.

(*a*) Thermomètres basés sur l'excès de dilatation des liquides sur les solides. [Académiciens de Florence, Réaumur, Celsius, Fahrenheit, etc.]

Procédés pour le calibrage des tubes de verre, et pour construire, remplir et graduer les thermomètres à mercure, alcool ou éther.

Thermomètres à acide sulfureux ou acide carbonique, à l'état liquide.

Thermomètres dont la boule est protégée pour pouvoir mesurer les températures sous une forte pression. [W. Thomson, Miller, Casella, etc.]

Thermomètres enregistreurs (cette classe est très-nombreuse, mais le meilleur est le thermomètre photographique).

Thermomètre statique. [Cavendish, etc.]

(*b*) Thermomètres basés sur l'excès de la dilatation d'un gaz sur celle d'un solide.

Thermomètre à air ordinaire. [Galilée, Drebbel, etc.]

Thermomètre différentiel. [Leslie, Rumford, etc.]

Thermomètres à air, scientifiques ; en particulier ceux à pression constante, et éliminant les effets de transpiration à une haute température. [Regnault, Joule, Ste. Claire Deville, etc.]

(*c*) Thermomètres basés sur les dilatations relatives des solides.

Thermomètres métalliques. [Breguet, etc.]

Pyromètres. [Wedgwood, Daniell, etc.]

Thermomètres donnant la température moyenne. [" Creeper " de Stevenson, etc.]

(*d*) Pile thermo-électrique et galvanomètre. [Nobili, Schweigger, Melloni, etc.]

L'étude des courbes thermo-électriques montre que, lorsque la chaleur spécifique électrique est égale dans deux métaux à toute température, le courant thermo-électrique produit dans un circuit de ces métaux est directement proportionnel à la différence de température absolue de leurs points de soudure. En disposant trois métaux dans un circuit, dont deux en arc multiple, il est facile de produire le même résultat, même si la chaleur spécifique électrique a des valeurs différentes dans les trois.

(*e*) Thermomètres basés sur la résistance électrique. [Siemens, etc.]

IV.—Sources de Chaleur.

(*a*) Fourneaux.

(*b*) Lampes de Bunsen, chalumeaux, etc.

(*c*) Arc électrique.

(*d*) Chaleur solaire, lentilles et miroirs ardents.

(*e*) Combinaisons chimiques, chaleur de combinaison. [Andrews, Favre et Silbermann, Thomsen, etc.]

(*f*) Mélanges frigorifiques.

Appareils pour produire le froid par la dilatation, l'évaporation, etc.

V.—Transmission de la Chaleur.

La chaleur peut se transmettre d'un point à un autre dans l'intérieur d'un corps par Conductibilité; ou d'un corps à un autre (même à travers le vide), par Rayonnement; ou bien encore d'une place à une autre dans un même corps, ou dans une même partie d'un corps, par Convection (*courants*).

(*a*) Conductibilité.

Nous devons la connaissance des lois de la conductibilité de la chaleur dans les solides principalement à Fourier, qui a donné le premier une définition satisfaisante de la conductibilité thermique, ou pouvoir conducteur, en faisant connaître en même temps les

méthodes mathématiques, originales et remarquables, qu'il avait appliquées à ce problème.

La conductibilité est mesurée par le nombre des unités de chaleur qui passent, par unité de temps et par unité de surface, à travers une tranche indéfinie de matière, ayant une épaisseur égale à l'unité, et dont les deux faces sont maintenues à des températures qui diffèrent entre elles d'une quantité déterminée, disons 1° centigrade. Le "flux de chaleur" à travers l'unité de surface en une partie quelconque d'un corps isotrope est ainsi proportionnel au pouvoir conducteur et au degré de chute de température par unité de longueur dans une direction perpendiculaire à la surface de la tranche.

Appareils pour mesurer la conductibilité. [Péclet, Biot, Langberg, Forbes, Ångström, etc.]

Appareil pour montrer la différence de la conductibilité dans diverses directions. [De Sénarmont, etc.]

Propagation de la chaleur de la surface de la terre pénétrant dans la croûte terrestre. [Quételet, Leslie, Forbes, etc.]

Perte de chaleur par la terre, conséquence de l'accroissement de la température avec la profondeur au dessous de la surface.

Instruments pour mesurer la température dans les trous de sonde, etc.

Emploi des corps mauvais conducteurs pour empêcher les pertes de chaleur, tels qu'enveloppes des cylindres des machines à vapeur, appareils pour conserver la glace, l'acide carbonique solide, etc.

(*b*) RAYONNEMENT. (Voir aussi Lumière, p. 132.)

Appareils pour mesurer la chaleur rayonnante.

Thermomètre différentiel de Leslie et ses variétés.

Pile thermo-électrique et galvanomètre de Melloni et de Forbes.

Appareils thermo-électriques pour déterminer la chaleur de la lune et des étoiles, et la température relative des taches et des facules du soleil. [Airy, Lord Rosse, Secchi, etc.]

Appareils pour la mesure absolue du rayonnement.

Appareils pour la loi du refroidissement dans le vide.

Pyrhéliomètre.

Radiomètre.

Appareils pour comparer la lumière avec la chaleur rayonnante au point de vue

De l'interférence,
De la diffraction,
De l'absorption,
De la réflexion,
De la réfraction,
De la double réfraction,
De la polarisation,
Et de la polarisation circulaire, etc. [Melloni, Forbes, etc.]

Appareils pour prouver expérimentalement l'égalité (dans toutes les circonstances) du pouvoir rayonnant et du pouvoir absorbant pour tous les rayons. [Stokes, Foucault, Stewart, Kirchhoff, etc.]

Appareils pour démontrer expérimentalement le principe fondamental de Kirchhoff, que plus un corps est chaud, plus il donne de radiations de basse température auxquelles s'ajoutent d'autres radiations plus réfrangibles. [Akin et Griffith, Tyndall, etc.]

(*c*) CONVECTION.

Procédés de Hope et de Joule pour la détermination du maximum de densité de l'eau.

Thermomètre par convection de Joule, pour la chaleur lunaire.

Appareils et procédés divers pour la ventilation, etc.

VI.—TRANSFORMATIONS DE LA CHALEUR.

(*a*) En travail—Machines à feu de toutes les espèces,
Machines à air,
Machines à vapeur,

Machines à éther et à chloroforme,

Machines à gaz.

(*b*) En mouvement visible et son—

Gouttières de Trevelyan, etc.

(*c*) En courant électrique—

Batterie thermo-électrique, etc.

(*d*) Appareils pour déterminer divers points de la théorie de la chaleur et des machines à feu.

Effets calorifiques produits par le passage d'un gaz sous pression à travers un diaphragme poreux.

Détermination du coefficient économique d'une machine parfaite.

Détermination du zéro absolu de température.

Appareils pour la théorie cinétique des gaz.

Détermination des écarts de la loi de Boyle pour divers gaz.

Appareils de diffusion.

Appareils pour le frottement des gaz, etc.

P. G. Tait.

APPAREILS MAGNÉTIQUES.

On peut dire que la science moderne du magnétisme date de l'apparition, en l'année 1600, d'un traité intitulé *De Magnete magnetisque corporibus et magno magnete Tellure, Physiologia nova* (Londres, 4to), par le physicien William Gilbert, de Colchester. C'est dans cet ouvrage qu'il a été démontré clairement pour la première fois, que le globe terrestre a les mêmes propriétés qu'un aimant, et que par conséquent l'action directrice exercée par lui sur l'aiguille d'une boussole n'est qu'un cas spécial de l'action réciproque de deux aimants. Avant Gilbert, George Hartmann, vicaire de St. Sebald, à Nuremberg, avait fait faire déjà de grands pas à l'étude des phénomènes magnétiques. Dans une lettre* au Duc Albert de Prusse datée du 4 mars 1544, Hartmann décrit quelques expériences qu'il avait montrées l'année précédente au roi Ferdinand de Bohême, frère de Charles V., et desquelles il ressort qu'il connaissait la répulsion et l'attraction magnétiques, et qu'il savait que les pôles de même nom se repoussent l'un l'autre, tandis que les pôles de nom contraire s'attirent. Il avait observé aussi que, contrairement aux idées généralement admises alors, lorsqu'on touche une des extrémités de l'aiguille d'une boussole avec le pôle d'un aimant, elle acquiert une polarité opposée à celle du pôle employé; de plus il savait que les variations de la boussole changent avec la position géographique; enfin,

* Un extrait de cette lettre a été publié par Moser (*Dove's Repertorium der Physik*), vol. ii. pp. 129–133. 1838.

c'est lui qui a trouvé l'inclinaison magnétique. Toutes ces découvertes avaient en elles-mêmes une importance fondamentale, mais elles ne paraissent pas avoir été connues de ceux qui auraient pu, partant de ces bases-là, travailler à faire avancer la science, et, quoique cela ne diminue en rien le mérite de leur auteur, nous ne pouvons pas les relier directement avec les connaissances actuelles sur le magnétisme. Les travaux de Gilbert au contraire n'ont jamais été perdus de vue, et dès leur publication, ils ont été reconnus comme le point de départ de la science magnétique positive.

Les premiers expérimentateurs ne pouvant pas avoir facilement de l'acier trempé à leur disposition, leurs plus forts aimants permanents étaient des aimants naturels ou pierres d'aimant. C'est à Servington Savery qu'on doit l'usage général des aimants d'acier (Phil. Trans. 1730).

En 1780 environ, Coulomb établit les lois des actions magnétiques réciproques, et posa les bases de la théorie mathématique du magnétisme qui a été édifiée ensuite par Poisson, Green, Gauss et d'autres. La science du magnétisme fit peu de progrès depuis lors jusqu'en 1820, où Arago découvrit l'électro-magnétisme*

* Suivant Horner (*Gehler's Physikalisches Wörterbuch*, vol. vi. p. 661 [édit. 1836]) les électro-aimants n'étaient généralement pas connus en Allemagne et en Hollande avant l'année 1830, où les professeurs Pfaff, de Kiel, et G. von Moll, d'Utrecht, les y importèrent après en avoir vu tous deux à l'Université de Londres (maintenant University College), dont M. Watkins, de la maison Watkins et Hill, était alors curateur.

Il ne sera pas non plus hors de propos de rappeler ici que des électro-aimants *tubulaires* tels que ceux sur lesquels l'attention a été attirée dernièrement en Angleterre, ont déjà été construits en 1850 en Allemagne par Römershausen. Ce dernier a trouvé en effet que la présence d'une enveloppe en fer doux, autour de la spirale d'un électro-aimant, en formant avec lui une sorte d'électro-aimant en fer à cheval, avec deux pôles de nom contraire concentriques, augmente la force portative de cet aimant. Ainsi, par exemple, avec un noyau de fer de 0·9 cm. de diamètre et 8·4 cm. de long, elle rend la force portative 64 fois plus grande. Cette construction est également connue en France depuis plusieurs années ; elle est décrite dans le *Traité de Physique* de Daguin (édit. 1861, vol. iii. p. 616), telle que l'ont imaginée MM. Favre et Kunemann.

et dota ainsi la science d'une nouvelle et puissante source d'aimantation. Enfin en 1831, Faraday trouva l'induction magnéto-électrique et ouvrit par là un vaste champ d'investigations.

Aussitôt après la découverte de l'électro-magnétisme on fit de nombreux essais sur la manière d'appliquer ce nouvel et puissant agent de force mécanique à des usages pratiques. Lorsqu'on trouva qu'un courant électrique, circulant autour d'un morceau de fer doux, pouvait y produire un degré intense d'aimantation, sans que pour cela sa propre force fût diminuée, on se fit une idée fort exagérée des résultats pratiques qui pourraient découler de l'emploi des machines électro-magnétiques. Quoique les recherches de Jacobi en 1840, et celles de Joule et de Scoresby en 1845 eussent dû faire tomber ces illusions, elles ne sont néanmoins pas complètement dissipées.

Faraday fit en 1845, avec l'aide d'électro-aimants très-puissants, deux de ses découvertes les plus mémorables. Il trouva, 1° que sous l'influence du magnétisme, certaines substances transparentes acquièrent la propriété de faire tourner le plan de polarisation d'un rayon de lumière polarisée qui les traverse dans la direction de l'axe d'un aimant; et, 2° que toutes les substances sont susceptibles de subir l'action magnétique, au lieu que cette qualité fût propre seulement au fer et à quelques métaux voisins, comme on le croyait auparavant. Il montra qu'au point de vue de leurs propriétés magnétiques les substances se divisent en deux classes, celles qui tendent à se rapprocher de la ligne des pôles magnétiques, et celles qui tendent à s'éloigner de cette direction. Il appela paramagnétiques les corps de la première catégorie, dont le fer peut être pris comme type, et diamagnétiques ceux de la seconde, dont le bismuth est le principal exemple. Les recherches de Faraday sur les effets optiques du magnétisme et du diamagnétisme ont été poursuivies et amplifiées par plusieurs expérimentateurs, parmi lesquels on peut citer Verdet, Plücker et W. Weber.

Coulomb a observé les lois de la distribution du magnétisme dans des aimants d'acier longs et minces, et Biot en a plus tard

établi la théorie mathématique. Cette théorie a été vérifiée ensuite par plusieurs savants, qui presque tous ont employé pour cette étude des méthodes basées sur les principes de l'induction électro-magnétique. C'est aussi avec des méthodes analogues qu'a été étudiée la distribution du magnétisme dans d'autres cas. On a fait ainsi des recherches sur le rapport existant entre l'intensité du magnétisme et celle de la source d'aimantation, et étudié le magnétisme à d'autres points de vue encore, par exemple dans ses rapports avec la force mécanique.

Une branche extrêmement importante de la science qui nous occupe, est celle qui traite des propriétés magnétiques de la terre. On ne sait rien de positif sur la découverte des propriétés directrices de l'aimant, mais l'emploi de l'aiguille aimantée pour la navigation était certainement connu dans l'ouest de l'Europe, au commencement du treizième siècle. Ce fut Colomb qui découvrit dans son premier voyage, le 13 septembre 1492,* que l'aiguille d'une boussole n'indique pas de tous les points de la surface de la terre la même direction. Nous avons déjà dit plus haut que ce fait était connu cinquante ans plus tard de G. Hartmann, qui avait observé que l'aiguille de la boussole marquait à Rome 6° et à Nuremberg 10° à l'ouest. Nous avons dit également que Hartmann avait remarqué aussi la propriété de l'aiguille aimantée, supportée en son centre de gravité, de plonger, comme si elle était rendue plus lourde par l'aimantation; mais la première mesure précise de l'inclinaison magnétique est due à Robert Norman, constructeur anglais, qui trouva en 1576, qu'à Londres l'inclinaison était de 71° 50′.

Il paraîtrait que, jusqu'à l'époque de Gilbert, on ne trouvait à ces travaux d'autre intérêt que le lien qui pouvait exister entre eux et les propriétés de la pierre d'aimant ou des aimants artificiels, mais lorsqu'on eut reconnu que les phénomènes en question étaient réellement une preuve des propriétés magnétiques particulières de la terre, leur étude acquit une immense faveur.

* Arago, *Œuvres*, t. iv., "Notices Scientifiques, 1," p. 468.

Au commencement du dix-septième siècle, le Jésuite Nicolas Cabœus découvrit que l'inclinaison magnétique variait suivant la position géographique, et il trouva qu'elle était d'environ 62° à 45° de latitude nord, et atteignait 72° à Londres. En 1617, il confia à un missionnaire de son ordre une boussole d'inclinaison, construite avec beaucoup de soin, et quoique le missionnaire soit mort pendant le voyage, Cabœus sut que l'inclinaison avait été en décroissant constamment à mesure qu'on approchait de l'équateur, et que plus au sud, près du cap de Bonne-Espérance, on avait remarqué une inclinaison vers le sud de plus en plus prononcée. Les variations séculaires de l'inclinaison et de la déclinaison ne pouvaient pas échapper à l'attention en présence des observations dignes de confiance, dont elles ont été l'objet pendant un grand nombre d'années. La variation diurne de la déclinaison fut découverte en 1683 par Tachard, missionnaire Jésuite à Siam, et sa variation horaire fut observée en mars 1722 par Graham, fabricant d'instruments en Angleterre.*

A la fin du premier quart de notre siècle, on a fait des progrès considérables pour la construction d'instruments magnétiques exacts et pour la manière de s'en servir, aussi a-t-on accumulé dès cette époque un grand nombre de mesures précises. L'année 1833 marque le commencement d'une ère nouvelle dans l'histoire du magnétisme terrestre. Dans cette année-là, Gauss publia son célèbre traité, *Intensitas vis magneticæ terrestris ad mensuram absolutam revocata*, qui plaça sur une base nouvelle la théorie et la pratique de l'observation magnétique, et qui a été en outre le point de départ de tout le système des mesures "absolues," dont l'importance est de jour en jour plus complètement reconnue dans toutes les branches de la physique. Divers physiciens avant Gauss, en particulier d'Entrecasteaux, Humboldt et Hansteen, avaient fait des recherches pour constater la force par laquelle une

* Les faits historiques rapportés dans ce paragraphe sont principalement tirés de l'article de Horner "Magnetismus," dans Gehler's *Physikal Wörterbuch*.

aiguille aimantée est attirée vers sa position d'équilibre dans les différentes parties de la terre, et au même endroit à des époques différentes. Mais la méthode adoptée pour ces observations servait seulement à *comparer* la force agissant à un moment donné, ou dans un certain endroit, avec celle qui agissait à un autre moment ou dans un autre endroit. Le grand pas fait par Gauss consistait à montrer comment on pouvait éliminer l'effet dû à l'aimant particulier employé. Au lieu de comparer seulement un endroit avec un autre, il mesure l'intensité absolue de la force magnétique en un lieu et en un moment déterminés, en fonction seulement des unités fondamentales de *longueur*, de *masse* et de *temps*. Gauss a grandement contribué au développement et à la pratique des observations magnétiques exactes par les perfectionnements qu'il a apportés à la construction des instruments, et entre autres par la substitution (déjà suggérée par Poggendorff en 1826) de règles divisées, qu'on observait par réflexion dans un miroir fixé à l'aimant, au moyen de la lunette d'un théodolite, donnant le moyen d'apprécier les plus légers changements de position angulaire.

En 1836 Gauss fonda l'Association Magnétique de Göttingue, en vue de provoquer des observations périodiques, simultanées, des éléments magnétiques dans différentes parties du monde, et organisées suivant un plan général. On consultera longtemps les comptes-rendus annuels de cette association, qui furent publiés par Gauss et Weber de 1837 à 1842, et cela non-seulement à cause du grand nombre d'observations précises qui y sont enregistrées, mais aussi pour les détails qu'on y trouve sur les méthodes les plus parfaites appliquées jusqu'ici à la mesure des phénomènes physiques de toute espèce. Quelques années plus tard, grâce en grande partie à sir Edward Sabine, le gouvernement anglais établit dans plusieurs de ses colonies des stations magnétiques, destinées à faire des observations d'après le système de Göttingue.

Nous ne devons pas oublier de mentionner en terminant les

perfectionnements importants apportés par Lamont, de Munich, et par Lloyd, de Dublin, à la construction des instruments magnétiques. Nous signalerons enfin la méthode imaginée en 1847, simultanément par M. Charles Brooke et par sir Francis Ronalds, pour fixer les variations des éléments magnétiques au moyen de la photographie automatique, et qui a été longtemps en usage dans les principaux observatoires magnétiques anglais.

G. Carey Foster.

APPAREILS ÉLECTRIQUES.

On divise généralement et d'une manière très-commode les phénomènes électriques en deux catégories principales; ceux qui proviennent de l'action mutuelle à distance des corps qui sont dans des conditions électriques différentes, et ceux qui accompagnent le retour à l'équilibre électrique.

Les phénomènes de la première de ces deux classes sont, avec raison, appelés ÉLECTRO-STATIQUES, puisqu'ils dépendent de l'existence d'un *état* électrique particulier, stable dans les corps qui les produisent; tandis que ceux de la seconde classe qui résultent d'un *travail* électrique, exigeant une dépense d'énergie sous une forme ou sous l'autre pour se produire d'une manière continue, s'appellent ÉLECTRO-DYNAMIQUES.

I.—ÉLECTRO-STATIQUE.

La première condition pour la production d'un phénomène électro-statique est d'avoir un moyen de développer un état électrique.* Les instruments servant à ce but sont communément appelés machines électriques.

* Ou plutôt *des* états, car, comme on le sait bien, il y a deux états électriques opposés qui sont entre eux dans un rapport tel, qu'un corps n'est jamais électrisé dans un sens, sans qu'un autre corps le soit dans l'autre sens, et au même degré. Il arrive souvent cependant, que quand un corps, tel que ceux que nous pouvons employer dans nos expériences, est électrisé dans un sens, le corps auquel l'électricité corrélative, égale et opposée, est communiquée est la terre, dont les dimensions sont si grandes que son état électrique n'est pas

Machines électriques.

1. *Machines par frottement.*—Celle de ces machines qui est la plus usuelle consiste en deux substances différentes exerçant un frottement l'une sur l'autre. Une de ces substances est généralement un disque ou un cylindre de verre et quelquefois d'ébonite, auquel on imprime un mouvement de rotation au moyen d'une manivelle, et l'autre un métal pâteux (amalgame) étendu sur du cuir ou de la soie, et serré contre le verre ou l'ébonite tournant. Les machines de cette espèce sont trop bien connues pour qu'il soit nécessaire d'en donner ici une plus longue description.

Machine hydro-électrique d'Armstrong.—La machine hydro-électrique d'Armstrong est un tout autre système, mais son action est très-semblable à celle des appareils dont nous venons de parler. L'électricité est produite par le frottement de l'eau contre les parois d'un tube à travers lequel elle est très-rapidement entraînée par un courant de vapeur.

2. *Machines d'induction.*—Un corps électrisé tend à amener l'état électrique de tous les corps qui l'avoisinent à se rapprocher du sien, exerçant cette action plus fortement sur ceux qui sont le plus près de lui. Ainsi, si un corps A électrisé positivement est amené près de deux conducteurs isolés (et non électrisés) B et C, chacun de ces deux conducteurs sera électrisé positivement, c'est-à-dire cherchera à communiquer de l'électricité positive à d'autres corps, et cela aussi longtemps que A demeurera dans son voisinage; si cependant B est plus près de A que C, il devient plus fortement positif que lui; ou en d'autres termes, la tendance de B à donner de l'électricité positive à C est plus grande que la tendance de C à donner de l'électricité positive à B.* Par conséquent si B et C sont amenés en contact l'un avec l'autre, l'électricité passe de B à

sensiblement affecté par la quantité d'électricité qu'on peut lui donner artificiellement: dans ce cas-là, le résultat *apparent* est le développement d'une seule espèce d'électricité.

* Pour parler un langage plus technique, l'effet produit par le corps A est d'augmenter l'électricité potentielle de tous les corps qui l'environnent.

C, dans une proportion qui dépend de la différence existant entre leurs deux électricités, et l'équilibre électrique s'établit entre eux. Si ensuite on les sépare l'un de l'autre et qu'on les place en dehors du rayon dans lequel s'exerce l'influence du corps A, on trouve qu'ils sont tous deux électrisés, B négativement et C positivement, tandis que A reste exactement dans le même état qu'auparavant, et capable par conséquent de produire de nouveau les mêmes effets sur B et C, ou sur tous les autres conducteurs qu'on pourrait leur substituer autant de fois qu'on le voudra. L'état électrique du conducteur B est plus prononcé, quand le conducteur C avec lequel il est mis en communication, pendant qu'il est sous l'influence de A, est la terre. L'ÉLECTROPHORE de Volta est l'application la plus importante et la plus connue du principe que nous venons d'indiquer ici. C'est sur ce même principe que repose la machine électrique de Bertsch, laquelle est un électrophore arrangé de manière à produire une action continue par un mouvement de rotation régulier.

Avec une disposition convenable, on peut amener le conducteur B, qui ainsi que nous venons de le dire peut être électrisé plusieurs fois dans un sens opposé à celui du corps A, à donner son électricité à un autre conducteur isolé A', l'électrisant ainsi de plus en plus. Si on fait alors agir à son tour le conducteur A' sur B, B sera électrisé dans le sens contraire de A', soit de même que le corps A. Si, lorsque B est électrisé ainsi, on fait passer de son électricité sur A, celui-ci sera électrisé plus fortement. Ainsi en faisant agir alternativement A et A' sur B, et en faisant rendre chaque fois par ce dernier à A ou à A' respectivement l'électricité qu'il a reçue pendant qu'il était sous l'influence de l'autre, chacun de ces corps sera électrisé à un degré toujours plus élevé, et agira par conséquent aussi avec une intensité toujours plus grande sur le conducteur B et sur l'autre conducteur, quel qu'il soit, avec lequel B est mis en communication à chaque opération. C'est là en quelques mots le principe de l'action de toute une catégorie de machines électriques.

Bennet a décrit, dans les " Philosophical Transactions" de 1787, un instrument de ce genre agissant par un mouvement réciproque, et l'année suivante Nicholson exposa un système perfectionné agissant par rotation continue. D'autres améliorations de détail furent encore apportées plus tard à cet instrument par Bohnenberger. Cependant ces appareils ne paraissent pas avoir été employés comme machines électriques dans le sens ordinaire de ce mot. Leur principale application était de développer des charges électriques déterminées et très-faibles, que leur faiblesse même rend impossible à mesurer directement. Mais employées de cette manière elles donnaient fréquemment des résultats contradictoires. Elles cessèrent donc d'être utilisées, et le principe même de leur construction fut presque perdu de vue, jusqu'à ce qu'il fût repris de nouveau dans ces dernières années, pour la construction de véritables machines électriques par Varley (1860), Holtz (1865), Töpler (1865), et sir William Thomson (1867, 1868). Dans les différentes machines électriques construites par Holtz, la partie qui représente le corps B dont nous avons parlé comme étant un conducteur, est un disque de verre tournant; par conséquent l'échange électrique qui a lieu entre lui et les parties qui représentent A et C, ne peut se produire qu'avec les portions qui sont successivement en contact direct avec lui.

Dans toutes les machines appartenant à la catégorie qui nous occupe, aussi bien que dans l'électrophore, une faible charge initiale d'une seule espèce est suffisante pour développer une quantité indéfinie d'électricité positive et négative. Il faut observer cependant que, pour obtenir ce résultat, on doit dépenser la force mécanique nécessaire pour maintenir le mouvement de la machine en opposition avec l'attraction et la répulsion électriques, suivant la loi bien connue, qui veut qu'il y ait une augmentation d'énergie électrique, quand le travail s'accomplit contre les forces électriques.

En dehors des méthodes indiquées plus haut pour produire un état électrique, on connaît encore beaucoup d'autres moyens d'obtenir le même résultat. Parmi ceux-ci, les systèmes qui

ont jusqu'ici acquis la plus grande importance pratique sont: 1°. Le contact de conducteurs hétérogènes accompagné, soit d'une action chimique, comme dans la batterie voltaïque (Volta, 1800), soit d'une différence de température, comme dans la batterie thermo-électrique (Seebeck, 1823); ou bien le mouvement de conducteurs électriques dans un champ magnétique, ou encore, ce qui revient au même, la variation d'intensité d'un aimant, dans le champ magnétique duquel se trouvent des conducteurs électriques immobiles (Faraday, 1831). On a appliqué chacun de ces principes, et apporté une foule de modifications dans le détail des arrangements, mais jamais on n'est arrivé, en partant de cette base-là, à produire une aussi grande quantité d'électricité, ni un aussi haut degré d'aimantation, ou comme on dit ordinairement un niveau potentiel électrique aussi élevé, qu'avec les machines fondées sur le frottement ou l'induction électrique; d'un autre côté, elles sont en général préférables à ces dernières, lorsqu'il s'agit de prolonger le travail de recombinaison électrique, dont dépendent les phénomènes électro-dynamiques.

Électroscopes et Électromètres.

Presque tous les instruments qui ont été imaginés jusqu'ici pour mesurer la charge électrique sont basés sur ce que la direction de la force électrique, à quelque point que ce soit, est la direction de la variation la plus rapide du potentiel; d'où il suit que si un corps électrisé est placé à égale distance de deux corps inégalement électrisés, il tendra à s'éloigner de celui dont l'état électrique (potentiel) diffère le moins du sien propre, et à se rapprocher de celui dont l'état électrique diffère le plus du sien; tandis qu'un corps électrisé placé à une distance inégale de deux corps électrisés également tendra à se rapprocher davantage encore de celui qui est le plus près de lui. *L'électroscope à feuilles d'or* de Bennet (1787) et *l'électroscope à pile sèche* de Bohnenberger sont des exemples d'instruments construits d'après ce principe. M. G. Lippmann a montré récemment (1873) que lorsque du mercure

et de l'acide sulfurique dilué sont en contact, une variation de potentiel entre eux entraîne un changement équivalent de la constante de capillarité sur la surface commune, de telle sorte que ce dernier peut servir à donner la mesure de quantités d'électricité au moins aussi faibles que celles qu'on peut découvrir avec les instruments qui fonctionnent par l'attraction et la répulsion électriques (*électromètre capillaire*).

Les électromètres mesurent la différence entre les potentiels de deux corps dont l'un est souvent la terre; et le principe fondamental sur lequel ils reposent tous (excepté l'électromètre capillaire de Lippmann), est que la tension électrique en un point quelconque est équivalente à la variation du potentiel en ce point.

L'électromètre à torsion de Coulomb, à l'aide duquel ce physicien a établi (1795) les lois fondamentales des actions électriques réciproques, comme ceux de Dellmann, Peltier, et Kohlrausch, donnent des déviations proportionnelles à la différence de potentiel entre le corps étudié et la terre. Dans les différents électromètres inventés par sir William Thomson, et en particulier dans l'électromètre à cadran, soit tel qu'il l'a construit lui-même, soit tel qu'il a été modifié et simplifié par Branly, la comparaison a lieu entre deux conducteurs isolés.

Accumulateurs et Condensateurs électriques.

L'accumulation de l'électricité exige l'emploi de conducteurs isolés. Quand un conducteur neutre est chargé d'électricité, son potentiel électrique, ou la tension de sa charge (positive ou négative) s'accroît en proportion directe de la quantité d'électricité qui lui est transmise. Il suit de là que deux choses limitent la charge qu'on peut donner à un conducteur. Premièrement, il y a toujours une limite pratique (sinon théorique), au potentiel électrique qui peut être atteint avec la machine électrique, ou toute autre source d'électricité employée pour charger le conducteur; et quand le conducteur a reçu suffisamment d'électricité pour que son potentiel soit devenu le même que celui de la source, il ne peut plus

en recevoir. Secondement, à mesure que le potentiel du conducteur s'élève, sa tendance à donner de l'électricité aux autres corps augmente, et alors, si on continue à lui en fournir, la déperdition résultant de l'isolement imparfait des supports et de l'air environnant, devient au bout d'un certain temps égale à l'apport, et la charge ne peut plus augmenter. La quantité d'électricité qu'un conducteur isolé peut recevoir, sans que son potentiel s'élève, au-delà d'une certaine limite, dépend en partie de la dimension et de la forme de sa surface, et en partie de la position et de la grandeur des autres conducteurs qui l'entourent. L'ensemble de toutes ces conditions réunies est exprimé par le mot *capacité*, la capacité d'un conducteur étant la quantité d'électricité nécessaire pour rendre son potentiel électrique égal à l'unité. D'où il suit d'une manière générale, que :

la quantité d'électricité dans un conducteur = son potentiel électrique × sa capacité électrique.

Ainsi quand un conducteur a été chargé jusqu'au plus haut point que pouvait atteindre son potentiel, on ne peut plus augmenter la charge qu'en augmentant sa capacité, ou, en d'autres termes, la mesure de la quantité du potentiel de la charge. Les instruments qui servent pour ce genre d'expériences sont connus sous le nom de CONDENSATEURS, et D'ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES. La bouteille de Leyde est celui d'entre eux qui est le plus usité. Cet appareil se compose de deux feuilles de papier d'étain collées sur les deux faces opposées d'une lame de verre. Pour charger l'une de ces feuilles positivement, on la met en communication avec le principal conducteur d'une machine électrique, tandis que l'autre est reliée (soit directement, soit à travers la terre) avec le coussin de la machine : si l'électricité provient d'une autre source, les deux feuilles de papier d'étain ou "armatures," ainsi qu'on les appelle généralement, sont reliées avec les parties qui correspondent au conducteur et au coussin ; la charge négative de la seconde armature diminue alors le potentiel positif dû à la charge

positive du premier, et *vice-versâ*, de sorte que, quand on a établi entre les deux armatures une différence de potentiel aussi grande que la machine employée le permet, la quantité d'électricité accumulée dans chacun d'eux est beaucoup plus grande que celle qu'on aurait pu obtenir en l'absence de l'autre.

Le moyen employé pour accroître la quantité d'électricité accumulée sur un conducteur est le même quand c'est l'imperfection de l'isolement qui limite la charge, que lorsque c'est la faiblesse du potentiel de la source électrique; et si, après avoir éloigné de la source les deux conducteurs opposés qu'il s'agit de charger, on les sépare encore l'un de l'autre, on peut élever le potentiel de l'un quelconque d'entre eux, de manière à ce qu'il dépasse de beaucoup celui de la source. On appelle *condensateurs électriques* les appareils organisés pour atteindre ce but. C'est Volta qui le premier a décrit un condensateur, en 1782.

On voit par ce que nous venons de dire, que *la quantité d'électricité*, *la capacité* et *la différence de potentiel*, sont entre elles dans une relation telle, que si, dans un cas donné, deux d'entre elles sont connues, on peut immédiatement en déduire la troisième. Les instruments nécessaires pour mesurer ces quantités ne peuvent donc pas être séparés les uns des autres. On distingue, d'une part, ceux qui donnent la mesure absolue de la capacité; ce sont des conducteurs isolés dont la capacité est déterminée par leurs dimensions—le plus simple est une sphère métallique placée à une grande distance de tous les autres conducteurs. D'autre part, ceux qui donnent la mesure relative de la capacité, ou condensateurs dont la capacité a été déterminée préalablement à l'aide d'un instrument à mesure absolue, et enfin les *accumulateurs ou condensateurs dont on varie à volonté la capacité*. On en trouve un exemple dans le *platymètre* de sir William Thomson, et dans d'autres instruments formés de la combinaison de deux ou plusieurs accumulateurs séparés. A côté de ces instruments-là il en est encore d'autres se rapportant au même ordre de recherches : ce sont les *électromètres pour les mesures absolues et relatives* des dif-

férences de potentiels, et les *balances de potentiels*, telles par exemple que celle de M. Latimer Clark.

L'étude de l'état du milieu isolant qui sépare deux surfaces électrisées de nom contraire se lie nécessairement à la mesure de la capacité électrique. Faraday a montré le premier (1837) que la capacité d'un accumulateur ne dépend pas seulement de la dimension et de la conformation de sa surface conductrice, mais aussi des propriétés du milieu isolant, de ce qu'il appelle son *pouvoir inducteur spécifique*. Plusieurs savants, et Boltzmann en particulier, ont depuis lors étudié ces propriétés. Kerr, de Glasgow, a montré tout récemment que le phénomène de la double réfraction optique se produit dans les solides et les liquides isolants, lorsqu'on maintient une différence de potentiel électrique entre deux surfaces qui les contiennent. Un autre point important à noter, dans ce qui a trait aux propriétés du milieu isolant dans ces circonstances, est la différence de potentiel nécessaire pour obtenir une décharge électrique à travers une couche d'une épaisseur donnée. Ce sujet a été étudié surtout par Riess, Rijke et sir William Thomson.

Les phénomènes qui accompagnent une décharge d'électricité accumulée, et les effets qui en découlent appartiennent exclusivement à l'électro-dynamique. Dans ce qui suit nous exposerons les principaux caractères de la décharge ; l'apparence qu'elle présente dans l'air ou dans d'autres milieux gazeux à différentes pressions, vue directement, et observée au spectroscope ; la durée de l'étincelle électrique ; ses effets calorifiques ; son caractère ondulatoire, et ses effets mécaniques.

II.—ÉLECTRO-DYNAMIQUE.*

Si deux conducteurs isolés A et B, ayant des potentiels électriques différents, sont reliés par un autre conducteur, ils arrivent

* Un grand nombre de savants réservent cette expression uniquement pour ce qui a trait à la force réciproque agissant entre des conducteurs traversés par le courant électrique ; ici, il comprend toute la branche de la science électrique qui s'occupe de l'électricité en mouvement.

très-vite à un état d'équilibre électrique caractérisé par l'identité du potentiel dans tout le système. Celui des conducteurs qui sert à relier les deux autres acquiert, pendant le court espace de temps nécessaire pour que l'équilibre électrique s'établisse, des qualités qu'il ne possède dans aucune autre circonstance, et qu'on résume en disant qu'il est traversé par un courant électrique. Si par un moyen quelconque on parvient à rendre constante la différence de potentiel entre A et B, malgré qu'ils soient reliés par un autre conducteur, celui-ci montrera d'une manière permanente les propriétés particulières qui n'étaient que momentanées dans le premier cas. Ces propriétés dynamiques demeurent les mêmes aussi longtemps que les conditions sont constantes, c'est-à-dire, que le courant électrique est continu, ou qu'une quantité d'électricité égale passe à travers toutes les sections transversales pendant chaque unité de temps.

La première condition nécessaire pour produire un phénomène électro-dynamique est donc l'existence et la durée d'une différence de potentiel entre deux points, et secondement, la liaison de ces deux points par un conducteur à travers lequel la différence de potentiel puisse donner lieu à un courant électrique.

Le genre d'instrument qui réalise le mieux la première de ces deux conditions est la *batterie voltaïque*, ou la *batterie thermo-électrique*, ou bien encore, si une succession rapide de courants de courte durée, ou de courants alternatifs peut produire l'effet voulu, une *machine magnéto-électrique* ou une *bobine d'induction*. Dans certains cas spéciaux on peut se servir avec avantage de machines électriques ordinaires, mais quoiqu'elles soient capables de produire de grandes différences de potentiel entre des conducteurs isolés, il n'est pas possible de maintenir avec elles une constance à beaucoup près aussi forte qu'avec les appareils dont nous avons parlé précédemment.

La disposition générale de la batterie voltaïque est bien connue. Depuis que Daniell a montré (1836) comment on pouvait établir des batteries constantes, on y a fait d'innombrables

modifications, mais aucune qui soit fondamentale; plusieurs perfectionnements considérables ont été imaginés cependant dans les dernières années, en vue de rendre les batteries voltaïques pratiquement plus commodes et de faciliter leur emploi pour des recherches. On peut en dire autant des changements survenus dans la construction des batteries thermo-électriques.

Pour ce qui est des machines magnéto-électriques, on leur a fait subir dans les dernières années des modifications fondamentales. Les premières furent construites en 1832 (par Pixii et par Dal Negro) presque immédiatement après que Faraday eut annoncé sa découverte de *l'induction magnéto-électrique*, c'est-à-dire de la production d'un courant électrique dans un conducteur formant un circuit fermé, lorsqu'un changement a lieu dans la force magnétique totale agissant à travers l'espace contenu dans le circuit. Il est évident que ce phénomène peut se produire de deux manières: 1°, par un changement dans la force magnétique elle-même, ou 2°, par un changement dans la forme ou la position du circuit. La spirale d'induction est une application du premier de ces cas, ainsi que quelques machines magnéto-électriques, celle de Pixii entre autres; mais l'action de la plupart de ces dernières dépend principalement du second, quoique dans beaucoup d'entre elles les deux principes soient appliqués conjointement. Siemens et Halske (1857) furent les premiers qui travaillèrent à améliorer ces machines en y introduisant un arrangement de "l'armature" qui permette d'utiliser presque toute la force d'un grand nombre d'aimants d'acier: un morceau de fer doux entouré d'un fil de cuivre isolé faisant armature, produisait par son mouvement entre les pôles d'un aimant les variations voulues de la force magnétique agissante. Wilde montra en 1866 qu'on pouvait augmenter considérablement les effets en faisant tourner une armature de Siemens entre les pôles d'un gros électro-aimant, dont le magnétisme était développé par le courant d'une machine plus petite et pourvue d'aimants d'acier permanents. S. A. Varley dans la même année, et Siemens et Wheatstone simultanément l'année suivante, construisirent

des machines dans lesquelles l'aimant permanent était complètement éliminé, et le courant fourni par un électro-aimant très-faiblement électrisé servait à renforcer le magnétisme de l'aimant qui le produisait, de manière à ce qu'il donnât un courant plus fort qui développait une aimantation plus grande encore, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la résistance des conducteurs et la quantité de force toujours croissante, nécessaire pour faire marcher la machine, empêchassent d'augmenter davantage l'effet. Toutes les machines dont nous nous sommes occupés jusqu'ici donnent, non un courant continu, mais des courants se succèdant rapidement les uns aux autres en sens opposé, la direction étant changée deux fois pendant chaque rotation de l'armature. En 1871, Gramme inventa une machine qui donne un très-grand nombre de courants successifs de courte durée et dans la même direction pendant le cours d'une révolution de l'armature. Elle contient un anneau de fer doux qui tourne autour d'un axe perpendiculaire à son plan, entre les pôles d'un aimant, de manière à ce qu'un de ses diamètres coïncide toujours avec la ligne qui joint les deux pôles. Cet anneau est entouré d'une spirale de fil de cuivre isolé, chacun des tours du fil étant dans un plan passant par l'axe de l'anneau, et les extrémités de la spirale étant jointes ensemble et formant un circuit continu. À des intervalles égaux et très-rapprochés, la spirale présente des embranchements qui la relient à d'autres conducteurs. Voici en quelques mots quelle est l'action de la machine : la ligne des pôles de l'aimant partage l'anneau en deux parties semi-circulaires dans lesquelles l'action inductrice est égale et contraire. Cette action est nulle sur une partie donnée de l'anneau, lorsque celle-ci est le plus près de l'aimant ; elle croît ensuite graduellement jusqu'à 90° de la position initiale, là elle devient maximum, puis elle diminue, redevient nulle dans le voisinage immédiat de l'autre pôle, et dans la seconde moitié de sa course elle passe par les mêmes valeurs, seulement de sens contraire.

Suivant les lois de l'induction magnéto-électrique, il se produit donc une série de courants successifs dans la spirale à mesure

qu'elle tourne. La rotation du fer doux n'a aucune part essentielle dans l'action, puisque, à cause de la symétrie, les différentes parties de cet anneau sont égales deux à deux.

Pour qu'un courant électrique parcoure un certain chemin entre deux conducteurs maintenus à des potentiels différents, ce trajet ne doit pas seulement être occupé par une substance conductrice, mais il faut encore que cette substance elle-même soit isolée, par une substance non conductrice, de tous les corps à travers lesquels le courant ne doit pas passer. Dans la plupart des cas les fils de cuivre sont les conducteurs les plus propres à faire marcher le courant dans la direction voulue, et le meilleur moyen de les isoler est de les entourer d'une couche d'air suffisamment épaisse ; mais lorsque la couche d'air ne peut pas avoir l'épaisseur nécessaire, comme par exemple quand le fil doit être enroulé en une spirale serrée, ou quand l'emploi de la couche d'air isolante est exclu, comme dans le cas des fils du télégraphe sous-marin, on peut le remplacer complètement par une enveloppe de coton, de laine, de soie, de gutta-percha, de gomme élastique ou de quelqu'autre corps solide isolant.

Les appareils usités pour mettre en évidence l'existence des courants électriques et constater leur direction s'appellent *galvanoscopes ;* et ceux qui servent à mesurer la force du courant *galvanomètres.* On peut exprimer ainsi le principe sur lequel reposent tous les galvanoscopes et la plupart des galvanomètres construits jusqu'à présent :

Un aimant et un circuit conducteur traversé par un courant électrique tendent à se placer dans une position relative telle que la force magnétique agissant à travers l'espace contenu dans le circuit soit un maximum.

Dans l'application de ce principe il importe de se rappeler, qu'un circuit conducteur traversé par un courant dont la direction apparente concorde avec celle des aiguilles d'une montre, est équivalent à un aimant dont le pôle sud serait du côté de l'observateur. Les conditions mentionnées ci-dessus sont remplies

quand la force magnétique due au courant, et celle due à l'aimant, agissent dans le même sens, et quand toute la force de l'aimant agit à travers l'espace entouré par le courant. Ce fut Oersted qui découvrit en 1820 le fait qu'une force réciproque s'exerce entre un conducteur immobile traversé par un courant et un aimant, et peu de temps après (1821) Schweigger et Poggendorff imaginèrent, presque simultanément, le galvanomètre ordinaire avec une spirale multiplicatrice et une paire d'aiguilles astatiques. C'est un point très-important dans la construction des galvanomètres que la force magnétique venant du courant soit aussi grande que possible à l'endroit où l'aiguille est suspendue. W. Weber, sir W. Thomson et H. Weber ont fait des recherches sur l'arrangement du fil conducteur le plus propre à remplir cette condition. Dans les instruments destinés à faire voir les changements rapides dans la force ou la direction du courant, il est nécessaire que les parties mobiles aient une très-faible inertie. Sous ce rapport les galvanomètres de sir William Thomson marquent un grand progrès sur ceux qu'on avait auparavant. La petitesse de l'aimant, qui permet de faire circuler le courant un grand nombre de fois autour de lui avec un fil comparativement court, accroît aussi beaucoup la sensibilité de l'appareil, même dans le cas de courants de force constante.

Outre les galvanoscopes dans lesquels un conducteur fixe agit sur un aimant mobile, on en a construit d'autres où c'est un aimant fixe qui agit sur un conducteur mobile. Le plus ancien instrument de ce genre paraît avoir été le *galvanoscope à feuille d'or*, instrument excessivement sensible qui a été décrit par Cumming (voir ses "Electro-dynamics," p. 177: 1827) ; il consistait en une paillette de feuille d'or suspendue entre les pôles d'un aimant en fer à cheval, et faisant partie du circuit dans lequel passait le courant. Plus récemment sir William Thomson a appliqué ce même principe dans son "Siphon Recorder."

Le procédé généralement adopté dans la construction des galvanomètres pour *mesurer la force* des courants électriques, est

de placer une portion du circuit, de longueur connue, dans une position exactement définie par rapport à une aiguille aimantée, et de calculer ensuite la force exercée par le courant sur l'aimant d'après l'angle dont l'aimant s'est écarté de sa position d'équilibre, en connaissant l'intensité de l'action magnétique terrestre sur l'aimant. Les meilleurs modèles d'instruments de ce genre sont, la *boussole des tangentes* et la *boussole des sinus* de Pouillet (1837). Dans le *galvanomètre à torsion* de Ritchie, et dans quelques autres instruments construits depuis sur le même principe, on déduit l'action réciproque du courant et de l'aimant, de la torsion du fil élastique qui lui est équivalente.

On peut employer pour des mesures absolues des galvanomètres dans lesquels on ne connaît pas la distance réelle qui sépare le condensateur de l'aimant, si la valeur de leurs indications a été déterminée par des comparaisons avec un galvanomètre de dimensions connues.

On peut aussi déduire la puissance du courant de la quantité de force déployée entre deux portions déterminées, du circuit occupant des positions relatives déterminées aussi. Les instruments basés sur ce principe ont été nommés *électro-dynamomètres;* le premier a été construit par Weber (1846).

La mesure des courants électriques se fait par la méthode voltamétrique, qui repose sur la loi établie par Faraday (1833), savoir : que quand un courant électrique traverse un liquide conducteur composé, il décompose une partie du liquide proportionnelle à la quantité d'électricité transmise.

L'intensité du courant électrique qui traverse un conducteur, dépend de la substance et des dimensions du conducteur, et de la différence de potentiel entre ses extrémités ; ce qu'on exprime en général comme suit :

*l'intensité d'un courant électrique dans un conducteur = la différence de potentiel entre ses extrémités × son pouvoir conducteur.**

* Il est souvent plus commode pour exprimer l'influence des dimensions et de la substance d'un conducteur sur l'intensité d'un courant transmis par lui,



Ce rapport, et c'est là un fait remarquable, est exactement semblable à celui dont nous avons parlé ci-dessus (page 172), entre la quantité de la charge électrique, le potentiel et la capacité d'un conducteur isolé : dans un des cas comme dans l'autre, si on mesure deux des trois conditions requises, on a indirectement la valeur de la troisième. Cependant ce rapport pris isolément ne fournirait que des mesures comparatives des quantités considérées ; mais si on le combine avec celui qui relie le *travail* accompli par un courant dans un conducteur avec l'état électrique du conducteur, savoir que :

le travail accompli dans une unité de temps entre deux points quelconques d'un circuit électrique = la force du courant × la différence de potentiel entre les deux points donnés,—

les trois puissances électriques, intensité de courant, différence de potentiel et pouvoir conducteur, peuvent être exprimées en fonctions des unités employées pour la mesure du travail, soit, les unités de longueur, de masse et de temps, et on dit alors qu'elles sont exprimées en mesure absolue. L'introduction de mesures absolues dans la science électrique est due à W. Weber.

Nous avons déjà parlé du principe sur lequel repose la meilleure méthode pour la mesure directe des courants. On peut établir une règle absolue pour la mesure directe des différences de potentiel sur ce fait, que si un circuit est déplacé (en tout ou en partie) de manière que la force magnétique, agissant dans l'espace qu'il

d'employer le terme "résistance électrique," que celui de "pouvoir conducteur." Le pouvoir conducteur est inversément proportionnel à la résistance, et c'est du premier que nous avons parlé dans le texte afin de faire ressortir plus clairement l'analogie électro-statique à laquelle nous faisions allusion dans la ligne suivante. Il est plus facile de mesurer la résistance que le pouvoir conducteur parce que, dans les problèmes électriques pratiques, les additions et les soustractions des résistances se présentent plus fréquemment que les additions et les soustractions des pouvoirs conducteurs ; il semble de plus que l'expression de pouvoir conducteur signifie qu'un conducteur électrique possède par lui-même une propriété positive, en vertu de laquelle il peut donner lieu à un transport d'électricité, au lieu que l'idée la plus juste est probablement qu'il ne possède *aucune* propriété qui le rende capable d'empêcher le transport.

enveloppe, s'en trouve modifiée, il se produit une force *électro-motrice* équivalente à la différence de potentiel, et dont la valeur est constamment égale au degré suivant lequel la force magnétique varie. Il y a plusieurs méthodes pour mesurer de la sorte une différence de potentiel produite de n'importe quelle manière. Celles dont l'emploi est le plus avantageux sont celles imaginées par Poggendorff en 1841. La différence du potentiel (ou force électro-motrice) donne la mesure absolue de la résistance d'un conducteur dans lequel elle détermine un courant, cette mesure étant exprimée en fonctions des unités correspondantes. Ici encore, quand on a une fois établi un type absolu, on peut de plusieurs manières mesurer d'autres résistances en les lui comparant. Le procédé dont on se sert le plus souvent pour comparer les résistances est connu sous le nom de " Pont de Wheatstone " (dont S. H. Christie s'est servi le premier en 1833, et qui a été décrit plus en détail par Wheatstone en 1843). Il est basé sur ce que les résistances des conducteurs traversés par le même courant sont proportionnelles aux différences de potentiel entre leurs extrémités. Pour faire des comparaisons de ce genre, il est nécessaire d'avoir, outre le type original et des échantillons qui lui soient identiques, des conducteurs avec des résistances déterminées, qui sont des multiples ou sous-multiples de celles du type, pouvant s'ajouter au circuit conducteur, ou s'en séparer facilement.

Il est important de remarquer, à propos des méthodes applicables à la mesure des grandeurs fondamentales qu'on rencontre dans la science électrique, que dans certains cas, on peut mesurer une grandeur électrique—une quantité d'électricité par exemple —avec des procédés qui diffèrent non-seulement par les appareils employés et la nature des observations, mais aussi par les principes physiques sur lesquels ils reposent. Ainsi dans l'électrostatique, on calcule une quantité d'électricité (soit directement, soit indirectement) par l'attraction ou la répulsion électrique qu'elle exerce à une distance donnée, et on prend comme unité la quantité qui exerce, à une unité de distance (1^{cm}) sur une quan-

tité égale, une action égale à une unité de force (1 dyne). En électro-dynamique, l'unité d'électricité est la quantité qui traverse une section transversale quelconque d'un conducteur, quand un courant d'une unité de force passe dans le conducteur pendant une unité de temps (une seconde). La mesure électro-dynamique d'une quantité d'électricité dépend donc de la mesure de la force d'un courant, et celle-ci est basée (directement ou indirectement) sur la force magnétique exercée par le courant dans son voisinage ; l'unité de force du courant étant la force d'un courant qui, dans le temps où il parcourt une unité de longueur sur la circonférence d'un cercle de rayons, produit une force magnétique égale à l'unité au centre du cercle. Si on mesure la même quantité d'électricité, tantôt avec la méthode basée sur le phénomène électro-statique, et tantôt avec la méthode basée sur le phénomène électro-magnétique, on trouve que la valeur numérique obtenue dans le premier cas, est en chiffres ronds 3×10^{10} (trente mille millions) de fois aussi grande que la valeur numérique obtenue dans le second cas. En d'autres termes, la quantité d'électricité, qui est prise comme unité dans les calculs électro-magnétiques, est presque trente mille millions de fois aussi grande que la quantité prise comme unité, quand il s'agit des phénomènes électro-statiques. Weber et Kohlrausch ont les premiers fait (1857) une détermination expérimentale du rapport existant entre ces deux unités ; d'autres déterminations ont ensuite été faites par sir William Thomson (1868 et 1873) et par Clerk-Maxwell (1869).

On pourra peut-être se faire une idée plus claire de la nature du rapport qui lie ces deux unités par les considérations suivantes. Qu'on suppose une unité électro-statique d'électricité positive, entraînée autour de la circonférence d'un cercle d'un centimètre de rayon avec une vitesse uniforme de v centimètres par seconde ; l'effet produit au centre du cercle sera le même, que si un conducteur long de v centimètres enveloppait le cercle, et qu'il fût traversé par un courant entraînant par chacun de ses points en une seconde une unité électro-statique d'électricité. Mais un

conducteur dont la longueur serait v faisant passer une unité d'électricité par seconde produirait le même effet qu'un conducteur ayant une unité de longueur, faisant passer v unités d'électricité par seconde ; par conséquent, pour que la force magnétique au centre du cercle soit une unité, la mesure numérique de la vitesse v doit être égale au nombre d'unités électro-statiques contenues dans une unité électro-magnétique.

Les différents effets que peut produire le courant électrique représentent les différents travaux par lesquels il peut manifester sa présence. Nous avons déjà dit (page 181) que le travail accompli dans une unité de temps dans la partie d'un courant électrique qui est comprise entre deux points donnés, est égale à la force du courant multipliée par la différence de potentiel entre ces deux points. On peut ajouter ici, que si le courant se dirige du point où le potentiel est le plus élevé vers le point où il l'est le moins, le travail est *fait par le courant ;* tandis que si le courant passe du point où le potentiel est le moins élevé à celui où il l'est le plus, le travail consiste à *maintenir le courant.* Nous savons cependant que si, partant du point A d'un circuit électrique, nous suivons la direction du courant, pour arriver au point B où le potentiel est le plus bas, et que nous continuions à suivre le courant, nous finirions par revenir du point B au point A ; c'est-à-dire que nous passerions du point où le potentiel est le plus bas, à celui où il est le plus élevé. En conséquence, puisque la force du courant qui traverse n'importe quelle section du circuit est la même, il suit de là que la somme nette du travail fait *par* le courant dans une partie quelconque du circuit est égale à la somme nette du travail accompli dans le reste du circuit pour *maintenir le courant.*

On peut classer comme suit les différentes sortes de travaux que le courant électrique peut accomplir :

A. Le travail produit par un courant de force constante traversant un circuit dont aucune partie ne se déplace par rapport aux autres, ou par rapport à un autre circuit conducteur, ou à un

aimant, est entièrement *interne;* c'est-à-dire qu'il se manifeste, dans l'intérieur des conducteurs dont se compose le circuit, sous l'une ou l'autre des formes ci-dessous :—

(1) Comme développement de chaleur dans des conducteurs d'une seule substance.
(2) Comme développement de chaleur accompagné de transport de chaleur occasionnant une inégalité de température, dans des conducteurs métalliques composés de plusieurs substances.
(3) Comme développement de chaleur simultanément avec une décomposition chimique, dans un conducteur formé d'un liquide composé.

B. Quand la force du courant ou la position du circuit, relativement à d'autres conducteurs ou à des aimants, change, il peut se produire, outre le travail intérieur dont nous avons parlé tout à l'heure, un travail plus ou moins grand à l'extérieur du circuit.

Ce travail extérieur peut revêtir les formes suivantes :

(4) Induction magnétique, soit développement de magnétisme dans les substances susceptibles d'aimantation.
(5) Production de courants induits dans d'autres conducteurs.
(6) Production de travail mécanique au moyen du mouvement des aimants ou des conducteurs transmettant des courants.

Joule a trouvé le premier (1841) les lois suivant lesquelles a lieu l'action (1). L'effet auquel nous avons fait allusion dans (2) a été découvert par Peltier (1834), et a été depuis lors soumis à une étude approfondie par Edlund (1870—71). Les lois de l'action chimique du courant (3) ont été établies par Faraday (1833). Le pouvoir magnétique du courant (4) a été observé pour la première fois par Arago (1820), et la production des courants induits (5), par Faraday (1831). Oersted a découvert en 1820 qu'il existe entre

les courants électriques et les aimants une force magnétique capable de produire un travail si on change leur position relative ; et dans l a même année, Ampère trouva qu'il se développe une force mécanique entre deux courants, ou deux parties du même courant. Il détermina les lois suivant lesquelles s'accomplit cette action, et il en tira la conclusion : qu'un circuit électrique fermé a les propriétés d'un aimant ; il montra en effet que tout aimant peut être remplacé par un système de courants circulaires.

La plupart des effets produits par un courant électrique sont dans une corrélation si intime avec la direction du courant, qu'ils sont renversés si le sens du courant est renversé. Ainsi lorsqu'un courant passe d'un morceau de bismuth à un morceau d'antimoine, il y a absorption de chaleur ; mais quand il passe de l'antimoine au bismuth, il y a développement d'une quantité de chaleur égale. Quand un courant passe entre deux plaques de platine immergées dans l'eau, cette dernière est décomposée et il y a dégagement d'oxygène à la plaque vers laquelle le courant entre dans l'eau, et production d'hydrogène libre à la plaque par laquelle il en sort : le renversement du courant produit le renversement de l'action chimique. De même un courant entourant un morceau de fer doux l'aimante, et si le courant est renversé, l'aimantation l'est aussi. Enfin s'il y a action réciproque d'un courant et d'un aimant, ou d'un courant sur un autre courant, avec un mouvement produit, le changement de sens du courant entraîne aussi celui du mouvement. Dans deux cas seulement l'effet du courant est indépendant de sa direction ; l'un est le développement de chaleur dans un conducteur homogène, l'autre, l'action exercée par une partie d'un courant sur une autre partie du même courant. La quantité de travail dépensé dans un temps donné pour produire un phénomène de la première espèce (réversible) est simplement proportionnelle à la force du courant, tandis que dans le cas d'un phénomène de la seconde espèce (d'effets non-réversibles) elle est proportionnelle au carré de la force du courant. Il y a encore entre les deux une autre différence : si un effet réversible, qui pourrait être

produit par un courant traversant un circuit conducteur dans une direction donnée, est provoqué par un agent extérieur, il engendre dans ce circuit un courant égal à celui qui l'aurait produit. Ainsi en échauffant certains points d'un circuit composé de plaques de deux métaux hétérogènes, alternant les unes avec les autres, et en refroidissant d'autres points, on produit un courant (thermo-électrique) dans la même direction que celui qui aurait causé une absorption de chaleur à la première place, et un développement de chaleur à la seconde. Si encore l'action chimique que produirait dans un liquide composé un courant de direction donnée, est obtenue par d'autres moyens, il en résulte un courant dans la même direction, pourvu que le liquide fasse partie d'un circuit conducteur. De même l'effet produit par un changement d'aimantation dans le voisinage d'un circuit conducteur, ou par un changement dans la position des aimants ou des courants par rapport au circuit, est de faire traverser le circuit par un courant opposé à celui qui à son tour aurait produit les changements en question. D'autre part, on n'obtient de courant, ni en chauffant ou en refroidissant une partie homogène d'un circuit conducteur, ni en déplaçant une partie du circuit par rapport à une autre. En définitive, les différentes méthodes employées pour produire des courants électriques reviennent toutes à obtenir un effet électrique aux dépens de l'énergie extérieure.

G. Carey Foster.

INSTRUMENTS ASTRONOMIQUES.

L'ASTRONOMIE considérée au point de vue des instruments qu'elle emploie, est une science d'application. L'histoire de l'astronomie pratique est celle de l'appropriation d'appareils déjà existants, au but spécial de l'étude des corps célestes. On a commencé par la mesure des angles ; on finit par une vaste collection d'instruments présentant l'application de presque toutes les branches des sciences physiques et mathématiques. Dans les Observatoires modernes on rencontre à chaque pas l'application des lois de l'Optique, de la Chaleur, de l'Électricité, de la Chimie et de la Dynamique.

L'introduction d'une nouvelle méthode d'observation ou d'un nouvel instrument n'abolit nullement ceux qui l'ont précédé ; en règle générale il y a eu addition plutôt que substitution. La mesure des angles se pratique avec encore plus de soin que du temps d'Hipparque ; mais cette mesure est plus exacte parce que l'emploi du télescope est venu s'ajouter à celui du cercle divisé. La mesure du temps est aussi essentielle qu'à l'époque du clepsydre ; mais maintenant le pendule le divise en intervalles égaux, et l'électricité marque cette division. Les couleurs des astres sont observées avec autant de soin qu'avant l'emploi du spectroscope ; mais à présent on étudie leur spectre et on recherche la cause de ses couleurs. On a continué à augmenter la puissance du télescope comme instrument d'observation oculaire, quoique actuellement on puisse conserver par la photographie les apparences de presque tous les phénomènes.

On peut diviser en deux grandes classes les instruments astronomiques :—

1° Ceux qui servent à observer les positions, les mouvements et le volume des diverses masses éparses dans l'univers. Ils sont du ressort de l'astronomie mécanique ou de la mécanique céleste.

2° Ceux avec lesquels on étudie les mouvements des molécules dont ces masses sont composées, afin de se rendre compte de leur constitution, de leur arrangement et de leurs déplacements. C'est le but de l'astronomie physique ou de la physique céleste.

Les instruments peuvent être disposés soit pour augmenter la puissance de la vision, soit pour obtenir des empreintes photographiques.

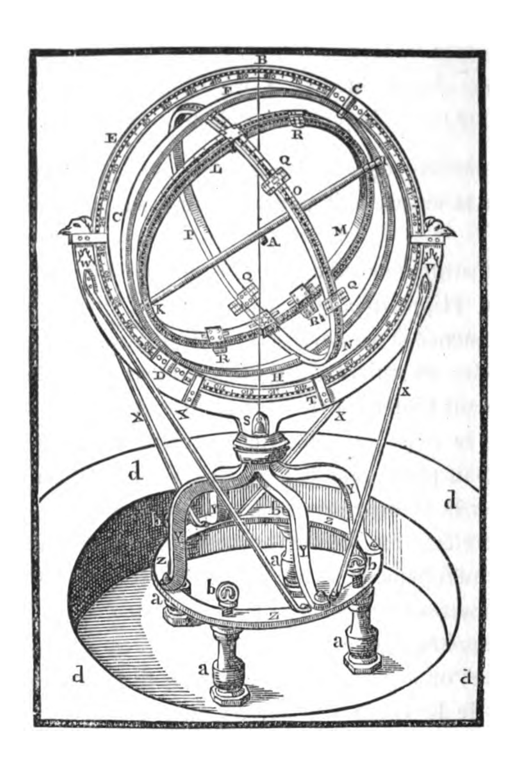
Tous les instruments compris dans la première classe dérivent de celui de Hipparque (160 av. J.-C.). C'est à cette époque qu'on a commencé à se servir du cercle divisé. Il se composait de deux cercles en cuivre d'inégale grandeur, dont le plus petit se mouvait dans l'intérieur de l'autre. Le plus grand était divisé en 360°, et le plus petit, intérieur, portait deux pointes. Cet instrument était placé dans le plan du méridien et on s'en servait pour observer la hauteur du soleil. Avec le quart de cercle, que Ptolémée préféra au cercle complet, ils furent les premiers instruments méridiens, et ils servirent d'ancêtres à tous les cercles muraux et lunettes méridiennes qu'on emploie de nos jours.

C'est à Hipparque que nous devons le premier instrument au moyen duquel on a pu déterminer des positions, sur une portion quelconque de la voûte céleste, ou faire ce qu'on appelle des observations extra-méridiennes. Son astrolabe et ses autres instruments ont été les précurseurs des *Armillæ aliæ Equatoriæ* et des *Armillæ Zodiacales* de Tycho-Brahé, ainsi que de tous les altazimuths et instruments équatoriaux modernes. Dans la Collection se trouve un modèle montrant, sous la forme la plus simple, les

principes de l'instrument qu'employait Hipparque pour déterminer l'ascension droite et la déclinaison, la latitude et la longitude des corps célestes, et grâce auquel il découvrit la précession des équinoxes.

Dans la représentation faite par Tycho de cet instrument se

ARMILLÆ ZODIACALES.



trouve un grand cercle E B C fixé dans le plan du méridien, et dont les pôles D et C correspondent aux pôles du ciel. Au dedans de celui-ci se trouve un autre cercle F I H, tournant sur les pivots D C et portant un troisième cercle O P, établi dans un plan per-

pendiculaire à la ligne passant par les points I K, placés à une distance des points C et D, égale à l'obliquité de l'écliptique ; en sorte que I et K représentent les pôles de l'écliptique, et le cercle O P l'écliptique elle-même. Enfin, un autre cercle R M, tournant sur les pivots I et K, représente un méridien de longitude sur lequel on compte les latitudes.

Cet instrument montre très-clairement les progrès accomplis par son inventeur Hipparque.

Comme le soleil est en été dans la portion de l'écliptique la plus proche du pôle nord, sa position est représentée par le point F sur l'écliptique, et par N au solstice d'hiver. Ainsi, connaissant l'époque de l'année, la pinnule Q peut être placée au même nombre de degrés de distance de F, que le soleil l'est du solstice, ou dans une position analogue sur le cercle O P à celle que le soleil occupe sur l'écliptique. Le cercle peut alors être tourné autour de l'axe C D, jusqu'à ce que la pinnule Q et la pinnule opposée à N, Q′ soient sur la même ligne droite que le soleil ; le cercle O P est alors dans le plan de l'écliptique ou de l'orbite de la terre autour du soleil. Le cercle R M est ensuite tourné autour de son axe I K, et les pinnules R R déplacées, jusqu'à ce qu'elles soient dirigées sur la lune.

La distance Q L mesurée sur O P sera la différence de longitude de la lune et du soleil, et sa latitude L R sera mesurée sur le cercle R M.

Mais pourquoi Hipparque se servait-il de la lune ? Son but était de déterminer la longitude des étoiles, et la seule méthode à sa portée à cet effet était de la rapporter à la position du soleil, indiquée dans des tables, en sorte que sa distance au point équinoxial était toujours connue. Ne pouvant voir à la fois le soleil et les étoiles, il déterminait de jour, pendant que la lune était à l'horizon, sa différence de longitude avec le soleil ; celle du soleil, ou sa distance au point équinoxial, étant connue par l'époque de l'année ; après le coucher du soleil, il déterminait ensuite la différence de longitude entre la lune et une étoile quelconque. Il

obtenait ainsi une approximation de la longitude des étoiles, et il réussit de cette manière à en cataloguer 1,022. Entre les mains de Tycho, l'instrument d'Hipparque fut remplacé par un quart de cercle, et une planète fut employée au lieu de la lune, ce qui donne une beaucoup plus grande précision à son œuvre. Cet appareil figure à l'Exposition comme une des reliques les plus intéressantes des temps passés.

Dans la magnifique collection d'instruments réunie par Tycho, on peut trouver tout ce que le génie de l'homme a pu inventer pour l'observation des corps célestes avant l'introduction du télescope. Outre le *Quadrans Muralis* et les *Armillæ* auxquels nous avons fait allusion, nous trouvons l'*Instrumentum Parallacticum sive Regularum*, pour la mesure des hauteurs ; le *Quadrans Maximus chalybeus quadrato inclusus et horizonti azimuthali chalybeo insistens*, le *Sextans astronomicus trigonicus distantiis rimandis*, et plusieurs autres.

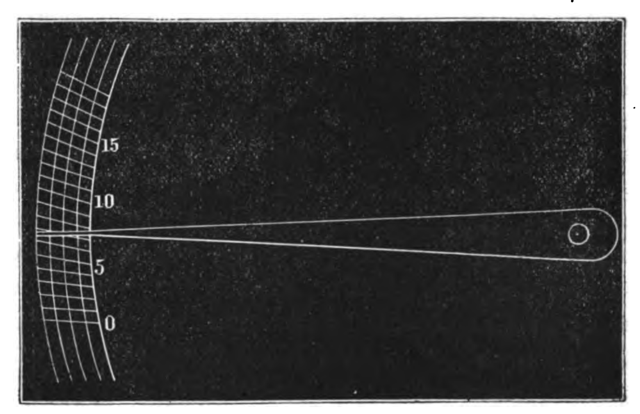
Tous ces instruments étaient de beaucoup plus grande dimension que ceux des Grecs, l'augmentation des dimensions étant nécessaire pour augmenter la précision des lectures. Ptolémée lisait les divisions de son quart de cercle, usité principalement pour observer la hauteur du soleil, en faisant tomber l'ombre d'un cylindre placé à son centre sur un autre, mobile le long du limbe divisé de son instrument. Hipparque pouvait observer jusqu'à une approximation de dix minutes d'arc. Tycho employait des alidades planes qui étaient pointées sur l'objet à viser. Les cercles étaient divisés en minutes d'arc, et en usant de transversales ou d'une échelle diagonale, suivant une méthode due à Richard Chanzler, d'après Digges (*Alæ seu Scalæ Mathematicæ*, Londini, 1573), l'arc était encore subdivisé en dix secondes. Cette méthode est appliquée au quart de cercle appartenant autrefois à Napier de Merchistoun, présenté par l'université d'Édimbourg.

On voit que de grands progrès avaient été accomplis dans les procédés employés pour mesurer l'espace. De même pour la mesure du temps ; car à l'observatoire de Tycho, le cadran solaire

de jour et les clepsydres la nuit, avaient été remplacés par des horloges, non pas comme celles que nous possédons aujourd'hui, réglées par des pendules, mais des horloges dirigées par les oscillations de barres chargées de poids, comme l'horloge de Douvres.

L'emploi des lunettes et du pendule, au XVIIme siècle, signale l'époque de transition la plus importante dans l'histoire des instruments d'astronomie.

L'usage d'un télescope dans l'astronomie pratique au lieu des cylindres de Ptolémée, et des pinnules adaptées au quart de cercle de Tycho et aux divers astrolabes, plaça l'art de déterminer les



Échelle Diagonale.

positions des astres et partant leurs mouvements, qui ne sont que des changements de position, sur des bases toutes nouvelles. Et ce n'était pas tout. Dans la lunette elle-même, en son foyer, Huyghens et Gascoigne, et après eux le marquis Malvasia, introduisirent bientôt un appareil pour mesurer de très-petits angles. La difficulté de cette opération sans le secours d'un appareil de ce genre est fort bien démontrée par Grant, dans son admirable "Histoire de l'Astronomie Physique," où il nous raconte que Tycho avait été tellement induit en erreur par ses mensurations

du soleil et de la lune, qu'il était arrivé à conclure à l'impossibilité d'une éclipse totale du soleil.

La bande métallique insérée par Huyghens dans son oculaire est maintenant représentée par le micromètre moderne, qui permet d'évaluer jusqu'à un centième de seconde d'arc.

Depuis l'époque de Hall et de Dollond (dont il sera fait mention ci-après), les lunettes sont constamment devenues plus grandes et plus parfaites ; en même temps la division des cercles gradués devenait plus précise et plus correcte. Dès lors les rôles ont changé, et au lieu de petites pinnules sur un arc de cercle gigantesque, nous avons une grande alidade (la lunette) sur un cercle comparativement petit. Cet état de choses a nécessité une métamorphose dans le montage des instruments. La lunette est maintenant le premier objet à considérer ; elle est généralement supportée par un axe central perpendiculaire à sa longueur, avec des tourillons très-exactement tournés qui reposent sur des coussinets en forme d'Y ; et le cercle divisé qui est adapté à l'une ou l'autre extrémité de l'axe est observé avec des microscopes armés de micromètres. On peut fort bien se rendre compte d'un instrument de ce genre en étudiant le modèle de la lunette méridienne de Greenwich (N° 1780). Un cercle vertical est suffisant pour des instruments des passages ou de premier vertical ; mais lorsqu'on demande de fournir aussi des azimuts, le système décrit tout à l'heure est arrangé de manière à tourner autour d'un axe vertical, et on y adapte un cercle horizontal semblable au cercle vertical. L'instrument des passages du professeur Bruhns, à Leipzig (N° 1770), montre comment l'introduction d'un prisme placé en face de l'objectif modifie ce genre de montage et fait entrevoir une nouvelle méthode qui sera sûrement fort employée à l'avenir.

Les instruments les mieux montés seraient toutefois sans valeur pour les recherches d'astronomie mathématique, si les positions qu'ils fixent n'étaient pas accompagnées d'une constatation exacte de l'instant des observations. Un matériel abondant à l'Exposition montre qu'aujourd'hui la chose est possible.

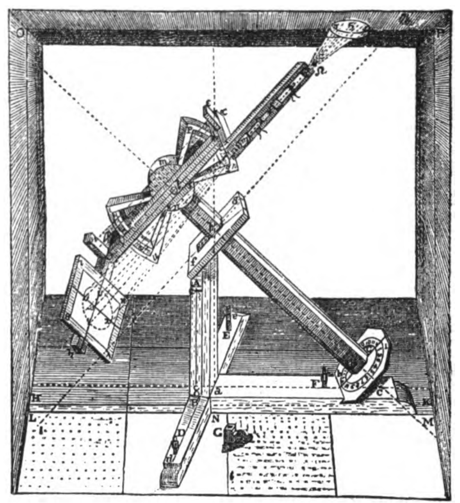
Les horloges grossières de l'époque de Tycho sont remplacées maintenant par des pièces bien voisines de la perfection absolue. La compensation du pendule ou du balancier du chronomètre est maintenant obtenue de différentes manières ; on a même introduit une manière de corriger l'irrégularité d'une pendule provenant des variations de la pression atmosphérique. Le cours du temps si parfaitement uniforme est maintenant en outre marqué électriquement d'une manière permanente par le moyen de chronographes (N° 1843), et la méthode d'apprécier de très-courts intervalles par " l'œil et l'oreille," en divisant mentalement en dixièmes l'intervalle des battements d'un pendule à seconde, est remplacée par une autre, qui nous permet de retrouver toujours aussi exactement que possible un instant ou un intervalle de temps, sur une échelle qui peut être aussi grande qu'on la désire. Si les observateurs étaient infaillibles, un millième de seconde serait aujourd'hui une quantité d'ordre considérable. (N°s 1871-5.)

Par l'emploi de l'électricité on peut non-seulement conserver l'empreinte des battements d'un pendule, mais la marche d'une horloge de comparaison peut servir à contrôler la marche de plusieurs autres (N° 1844).

Si, du domaine mécanique de l'astronomie, nous passons au point de vue physique, les premiers points à envisager sont les moyens d'obtenir une quantité de lumière aussi grande que possible, et de l'utiliser ensuite de diverses manières.

Nous ne pouvons aborder cette question ici qu'au point de vue instrumental. Il n'est pas besoin d'entrer dans l'historique de l'invention du télescope réfracteur. Il est évident que Galilée, dont la lunette a été envoyée de Florence pour l'Exposition, est l'homme qui l'a utilisée dans les premiers temps avec le plus de succès. Nous la trouvons composée à cette époque d'un objectif ne dépassant guère un pouce en diamètre. Dans quelques-unes des lentilles employées par Galilée cette dimension n'était même pas atteinte, et on trouva opportun, afin d'obvier à l'aberration

chromatique du verre, de rendre la distance focale aussi grande que possible. Les premières lunettes reçurent en conséquence la forme de cannes à main. Le grand pas franchi tôt après dans cette voie est dû à Huyghens et à d'autres fabricants de son temps, qui encore entravés par la même obligation d'avoir une longue distance focale, n'étaient plus réduits aux mêmes dimensions par suite des progrès réalisés dans la manufacture du verre. Parmi les envois de Hollande et de la Société Royale d'Angleterre,

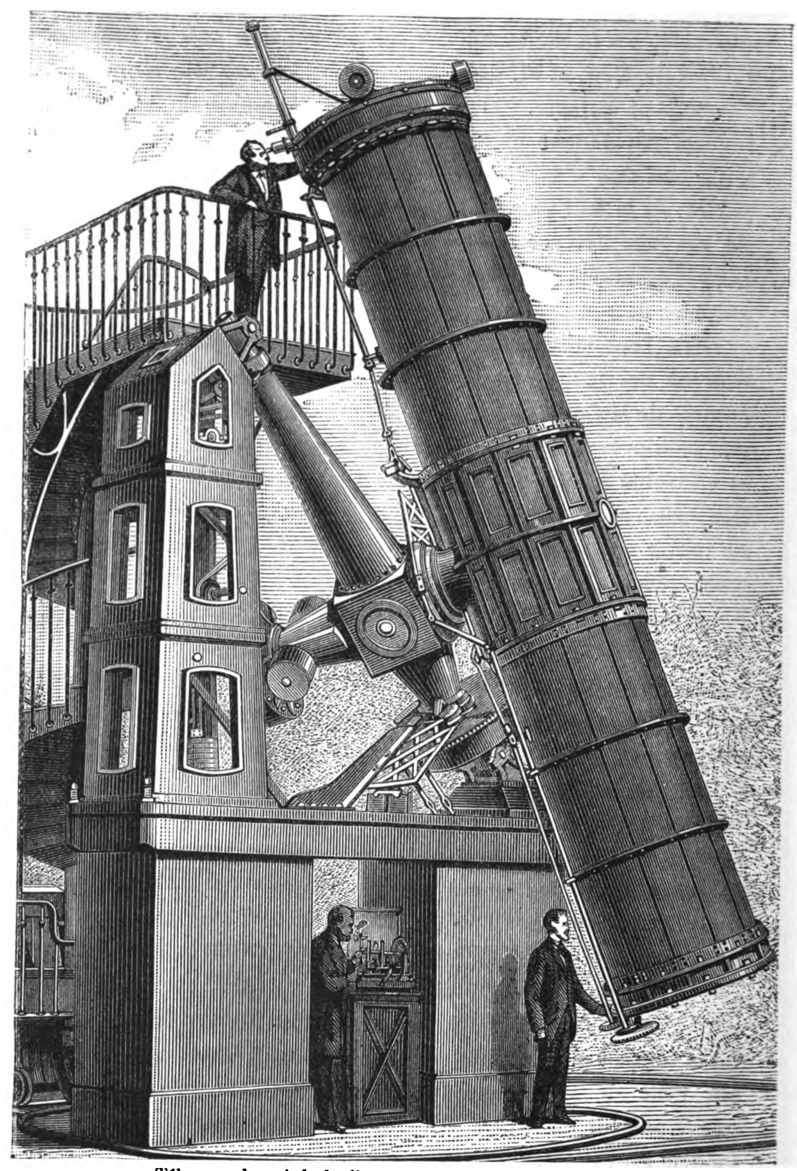


Lunette employée du temps de Galilée pour l'observation du soleil.

on rencontre un grand nombre de lentilles, dont quelques-unes ont une distance focale énorme, jusqu'à 360 pieds. Ces premiers produits de la science, malgré leur nature de lentilles simples (l'idée de l'achromatisme n'ayant été introduite que beaucoup plus tard), ont par le fait de leur distance focale et de leur forme exquise, les propriétés d'instruments astronomiques d'un très-grand pouvoir quoiqu'il fût presque impossible d'en user pour des observations vraiment utiles lors de leur fabrication. Les instruments de cette espèce appartenant à la Société Royale ont été

montés il y a quelques années sur un appareil spécial dans les jardins de Kew, et M. de la Rue a constaté que leur forme était absolument parfaite. Depuis ce temps l'emploi du sidérostat, inventé par Hooke et perfectionné par Foucault, a fourni une autre occasion d'apprécier leur excellence, et l'opinion formulée par M. de la Rue en a été amplement confirmée. Quelques-unes de ces lentilles sont aujourd'hui utilisées en vue d'obtenir des images agrandies du soleil, en permettant de prendre des photographies de son disque, et du spectre de ses différentes régions.

Dans l'opinion de Newton, qui vivait à l'époque de la fabrication de ces lentilles à long foyer, l'idée de corriger les effets colorés de la dispersion en améliorant ce genre d'instrument était une entreprise "désespérée." On eut donc recours à la réflexion, et en réalité le télescope à réflexion date du temps de Newton. Son instrument original, par lequel il démontra, qu'en employant un miroir au lieu d'une lentille, un télescope pouvait être infiniment réduit de dimensions, se trouve parmi les richesses de l'Exposition, avec d'autres réflecteurs construits par sir W. Herschel, par le feu lord Rosse et par les opticiens de notre époque. Hall et Dollond, tout en assistant aux progrès réalisés dans la construction des télescopes à réflexion, démontrèrent néanmoins que l'assertion de Newton concernant les réfracteurs n'était pas fondée, et maintenant le télescope à réfraction est construit dans des dimensions aussi restreintes, sinon plus restreintes que les réflecteurs. En même temps, à chaque progrès effectué dans la manufacture du verre, les lentilles objectives ont pu être augmentées, en sorte qu'aujourd'hui, l'ouverture d'un demi-pouce de la lunette de Galilée est remplacée par l'ouverture de 25 pouces du réfracteur de M. Newall, construit par Cooke à York; par les grandes lentilles de 26 pouces récemment terminées aux États-Unis par Alvan Clarke de Boston, et par celle de 27 pouces actuellement en préparation pour le gouvernement autrichien par M. Grubb de Dublin, et dont un modèle est exposé.



Télescope de 4 pieds de diamètre de l'Observatoire de Paris.

Aujourd'hui encore, néanmoins, le réflecteur maintient ses prétentions au point de vue des dimensions. Le miroir métallique de 2 pouces de Newton a été porté à 4 pieds par W. Herschel, à 6 pieds par lord Rosse, à 4 pieds de nouveau par M. Lassell. Depuis la découverte d'un nouveau procédé chimique par lequel une pellicule d'argent du plus beau brillant peut être appliquée sur une surface de verre, le lourd miroir métallique, pesant parfois plusieurs tonnes, a cédé la place à un miroir de verre plus mince et plus léger, qui a le grand avantage de conserver toujours sa forme. Le modèle le plus parfait de télescope à réflexion moderne est peut-être le magnifique équatorial récemment érigé à l'Observatoire de Paris, et muni d'un miroir de verre argenté de 4 pieds.

Les procédés que nous venons de décrire pour condenser la lumière peuvent avoir pour but d'accroître simplement le pouvoir de la vision ; on y applique alors divers oculaires, dont la construction dépend de principes introduits successivement par Newton, Herschel, Ramsden, Airy et d'autres. Mais l'emploi le plus intéressant des grands télescopes de nos observatoires actuels se lie à d'autres recherches, entre autres à celles qui ont pour objet l'étude spectroscopique ou polariscopique de la lumière, ou celle de la radiation calorifique des corps célestes. Pour l'examen spectroscopique des astres, on applique le spectroscope (instrument dont la description se trouvera ailleurs dans ce livre) au télescope à la place d'un oculaire. On fait tomber l'image, produite par un objectif ou par un miroir, sur la fente de l'instrument, et l'on obtient ainsi le spectre de diverses parties des corps célestes tels que le soleil, la lune, les planètes, les comètes ou les nébuleuses sans aucune difficulté, en observant que plus l'astre visé est brillant, plus le pouvoir dispersif du spectroscope employé peut être considérable. Dans le cas des étoiles, le spectre d'un point étant une ligne, il devient nécessaire d'élargir cette ligne en une bande, afin de rendre visibles les phénomènes d'absorption. On emploie dans ce but une lentille cylindrique, placée, ou devant

la fente, suivant la méthode suivie par M. Huggins, ou plus près de l'œil, conformément au procédé employé par plusieurs astronomes du Continent. Ici de nouveau, comme dans le cas d'observations ordinaires, nous pouvons remplacer la rétine par une plaque photographique et obtenir des empreintes du spectre des divers corps célestes, aussi bien que de la figure même de ces corps.

L'examen au polariscope des corps célestes prend une très-grande importance lors d'une éclipse totale de soleil; nous avons alors le moyen de déterminer la position dans l'espace des particules réfléchissant la lumière vers notre œil. Dans ce but il suffit d'introduire un bi-quartz ou un Savart devant un Nicol dans l'oculaire, et on peut voir alors les divers phénomènes de polarisation tels qu'ils se présentent dans l'examen d'une source lumineuse dans un laboratoire.

L'application d'une pile thermo-électrique au lieu d'un oculaire, pour déterminer le pouvoir de radiation calorifique des corps célestes a été faite, croyons-nous, pour la première fois par le prof. Henry, en vue de la détermination des températures des diverses portions du soleil. Depuis cette époque le procédé a été employé par M. Stone pour la chaleur des étoiles, et par lord Rosse pour la chaleur de la lune. Ce dernier a exposé l'instrument aujourd'hui employé par lui, et il est probable que, dans la suite des temps, un appareil de ce genre appartiendra au matériel ordinaire de tout observatoire d'astronomie physique.

Il est impossible dans une esquisse comme celle-ci de faire davantage que d'indiquer l'espace couvert par l'Exposition. Mais la collection qu'elle présente parle d'elle-même; et grâce aux observateurs de tous pays, il n'y a pas de portion du domaine de l'astronomie mécanique ou physique qui ne soit pas illustrée, soit par des objets d'intérêt historique, soit par des instruments de date plus récente, qui ont servi à des observations ou à des expériences destinées à survivre de beaucoup à ceux qui les ont faites.

J. NORMAN LOCKYER.

MÉCANIQUE APPLIQUÉE.

La science de l'ingénieur, en d'autres termes la *mécanique appliquée*, a pour objet l'utilisation des grandes sources de force de la nature par l'homme et à son profit; ses appareils sont si nombreux et si variés qu'on a dû en limiter la collection à un certain nombre de modèles et de types choisis, destinés à rappeler des souvenirs historiques et les progrès de la science dans cette branche, et à indiquer dans quel sens les professeurs et les étudiants doivent diriger leurs études pour l'application des principes de la mécanique.

Et d'abord il sera bon de rappeler les changements apportés dans ces dernières années, non-seulement à la nature et à l'étendue des matières dont la connaissance est indispensable à l'ingénieur, mais aussi aux méthodes qui doivent le diriger dans ses travaux.

Ce n'est pas seulement le fait que, depuis l'application des machines à vapeur (chef d'œuvre du génie inventeur), de nouvelles branches de l'art de l'ingénieur-mécanicien se sont ouvertes, exerçant le talent et les forces de ceux qui s'occupent à étudier "les sources de force dans la nature;" c'est aussi le désir de comprendre pratiquement, non-seulement les résultats, mais les procédés exacts qui ont été employés pour arriver aux inventions et aux perfectionnements obtenus pas à pas jusqu'à achèvement de l'œuvre; désir considéré maintenant comme tellement indispensable, qu'aucune conception abstraite n'a de valeur, si elle n'est accompagnée de l'étude exacte de la construction des appareils qui la concernent.

Plus d'un savant peut se rappeler le temps où une démarcation tranchée séparait le mécanicien théorique du mécanicien pratique. Le premier passait sa vie à l'écart dans les retraites académiques de nos universités ; il pensait, il réfléchissait, il inventait des méthodes d'étude ; il se souciait fort peu des travaux accomplis autour de lui par les ingénieurs, et ne croyait guère que le professeur eût besoin pour l'enseignement de s'occuper de choses telles que la réalisation d'une surface vraiment plane, la précision des mensurations, ou l'invention de machines destinées à raboter le fer, à faire du papier, à imprimer des journaux, à carder de la laine, ou à filer du coton.

Il est intéressant de lire les traités de mécanique écrits d'après cet ancien système, et de remarquer qu'ils sont aussi stériles et peu utiles qu'on pouvait raisonnablement l'attendre de la méthode d'après laquelle ils ont été conçus. Comme style et exposition, ils sont sans défauts ; comme exemples de raisonnements analytiques et logiques ils ne peuvent être surpassés ; ils sont pleins de problèmes dont la solution exige une grande aptitude mathématique ; mais malheureusement ils sont l'œuvre d'hommes qui sont restés tranquillement dans leur bibliothèque, qui n'ont travaillé qu'avec la lumière de leur imagination, qui n'ont jamais vu fonder une jetée, bâtir un pont, faire une machine à vapeur, et qui se croyaient compétents pour enseigner la plus pratique de toutes les sciences, sans en connaître aucunement la pratique. Il en est résulté que la mécanique des professeurs a revêtu une forme différente de celle qu'ont adoptée les mécaniciens et les ingénieurs qui nous ont donné nos chemins de fer, nos bateaux à vapeur, nos télégraphes, et qui ont rempli nos fabriques de machines pourvoyant à tous nos besoins.

C'est un fait très-remarquable, que ces mêmes hommes, qui ont écrit d'une manière si savante, sans faire faire de progrès à la mécanique générale, et dont l'insuccès résulte de ce que leurs recherches de la théorie étaient indépendantes de la pratique et de l'observation, ont suivi une méthode toute différente et sont

arrivés à de magnifiques résultats, dans une branche qui pourrait s'y rattacher, l'astronomie. Dans cette dernière science, la théorie et la pratique ont marché simultanément. Ceux qui ont étudié et complété le remarquable héritage intellectuel de Newton ont donné à leurs études une vitalité et une force, qui ne sont atteintes que lorsque les moyens d'observation et la patience vont de front avec les progrès théoriques.

La prédiction de la position d'une planète inconnue, par des calculs basés sur certaines perturbations, dont l'existence était constatée mais non expliquée, est un triomphe de l'intelligence dont tous les compatriotes du savant qui en est l'auteur ont droit d'être fiers; dans ce cas personne ne peut dire que la théorie et la pratique ne sont pas complètement d'accord. Heureusement l'époque est prochaine où, pour la mécanique comme pour les autres sciences, la théorie et l'observation marcheront toujours de pair; et l'Exposition actuelle ne peut manquer d'exercer une influence importante pour la confirmation de ce fait.

Il est vrai que les hommes qui dans ces dernières années ont inventé et perfectionné les machines servant à nos industries, que des hommes tels que Whitworth, Clement et Roberts, ont travaillé sans le secours de la science théorique, mais seulement à l'aide de leur génie naturel, ou par l'étude raisonnée de leurs observations; il est vrai que l'esprit inventif de Watt, Telford et Stephenson, quoique n'ayant jamais été développé par l'étude des mathématiques, nous a donné nos machines à vapeur, nos canaux, nos chemins de fer; et il faut avouer qu'il y a un champ très-étendu de science mécanique fort utile, dans lequel un homme peut travailler avec succès pour le bien de l'humanité, sans pour cela être apte à suivre des raisonnements mathématiques précis. Peut-on nier que les principes de la mécanique aient été compris par ceux qui ont façonné de leurs mains la matière même qui donne à cette science son existence? Ne devons-nous pas admettre que la voie si brillamment ouverte par ces hommes pourra être suivie sûrement par les centaines de mécaniciens qui peuplent

nos usines, et qui, bien dirigés, seront capables de résoudre une foule de problèmes concernant l'art de l'ingénieur, et de comprendre des mécanismes compliqués, sans autre secours que leurs réflexions attentives et patientes sur les principes en action, et par une comparaison approfondie des progrès successifs qui ont amené les inventeurs précédents au résultat définitif?

Un des buts de l'Exposition actuelle est de montrer la manière dont travaillaient ceux qui ont fait des découvertes, ainsi que les matériaux dont ils disposaient, et nous allons le prouver par des exemples. Tout le monde a entendu parlé du modèle de la machine de Newcomen, que Watt avait entrepris de réparer, et dont King's College a envoyé un fac-simile original. Nous pouvons aussi citer une collection intéressante présentée par M. Gilbert Hamilton, de l'usine de Soho près de Birmingham, qui peut servir à nous rappeler toutes les phases du travail intellectuel de Watt, en donnant une forme matérielle à ses conceptions relatives au condenseur séparé et à la force expansive de la vapeur. Il y a un peu plus de cent ans, l'industrie manufacturière de ce grand pays n'existait pas encore, quoiqu'elle fût prête à naître, aussitôt que le génie inventif du grand mécanicien, en voyant de pareils modèles, eût deviné un meilleur moyen de diriger " une des plus grandes sources de force dans la nature."

A cette époque les outils pour travailler le fer n'étaient presque pas suffisants pour construire une machine à vapeur. On raconte que le piston de la machine de Newcomen ne retenait hermétiquement la vapeur que grâce à une couche d'eau placée au sommet, et que dans la première machine de Watt, qui n'avait qu'un cylindre de 18 pouces de diamètre, on avait trouvé si difficile d'ajuster le piston avec le cylindre, qu'au premier essai le succès espéré fut en grande partie compromis. On sait bien que les difficultés de cette nature n'existent plus; une petite vitrine dans la collection le démontre, et indique la manière dont ce résultat a été obtenu. On y verra un spécimen splendide de surface plane, prêté par sir J. Whitworth et Cie., et beaucoup de personnes

examineront avec intérêt le mode de construction et de support de cette surface élémentaire à laquelle on se refère souvent, car c'est en effet la surface plane la plus parfaite à laquelle on soit encore arrivé.

On pourrait croire qu'une fois arrivé a produire ce qu'on appelle une vraie surface mécanique plane, il ne restait plus rien à faire, mais ce n'est que le commencement du travail. Par de rapides progrès dans la construction, sir J. Whitworth a fait pour son usine une machine à mesurer qui permet au mécanicien d'apprécier l'exactitude d'une mensuration avec une précision d'un dix-millième de pouce, et dans la collection se trouve un cylindre d'acier d'un pouce de diamètre qui sert d'étalon, et un collier correspondant, ou gabarit creux, dans lequel le cylindre s'adapte exactement. A côté est placé un second cylindre d'acier, dont le diamètre est plus petit d'un dix-millième de pouce: la différence d'ajustement due à cette dimension différente est parfaitement appréciable. Puisqu'il est possible de faire deux cylindres parfaits avec une si petite différence de diamètre et de mesurer cette différence à l'aide d'une machine, il est clair que nos moyens de construction ont singulièrement progressé depuis le temps de Watt. En vérité nous serions maintenant capables de construire une machine pouvant mesurer un millionième de pouce. Nous n'avons pas assez d'espace pour développer à fond ce sujet, ou pour montrer combien il y a à apprendre en examinant et en maniant des appareils de cette espèce, mais il est nécessaire d'indiquer que la possibilité de construire des surfaces parfaites et de les mesurer, sont les deux causes qui nous ont permis d'avoir des machines comme celles qui existent aujourd'hui. Ainsi une machine à planer est, comme son nom l'indique, un instrument destiné à multiplier les surfaces planes, ce qui se produit en transmettant à la pièce de métal sur laquelle on opère la direction exacte de la surface plane obtenue en premier lieu comme modèle. Le banc d'un tour est formé de surfaces planes glissant l'une sur l'autre. La base du tour doit également être plane pour s'appro-

prier à la direction de la coulisse. Le tour et la machine à planer produisent et corrigent les surfaces nécessaires à la construction des autres machines ; il est par conséquent indispensable qu'il soient eux-mêmes des modèles parfaits. Si nous portons notre examen en dehors de nos usines, nous verrons qu'il est impossible de séparer notre perfection dans la construction, de la base première sur laquelle elle repose, c'est-à-dire de la possibilité mécanique de produire des formes géométriques exactes.

Mais pour revenir aux machines à vapeur, il faut espérer qu'on réunira maintenant beaucoup de modèles pour en expliquer les diverses parties et beaucoup de diagrammes pour aider le professeur. L'École des Mines en expose une belle série, et les diagrammes de MM. Anderson et Shelley présentent une grande utilité. Nous voyons la première conception de la machine à cylindre complexe de Hornblower, et nous pouvons suivre la théorie de la force expansive de la vapeur aussi bien que la pratique. L'application de ce principe à la navigation à vapeur est d'un haut intérêt, et tout ce qui en facilitera la démonstration sera d'une grande valeur. Dans cette notice, l'auteur a visé à signaler l'avantage qu'il y aurait à donner de l'extension à l'enseignement mécanique par des raisonnements serrés et précis sur des faits observés ; et il est bon de remarquer ici que le développement de la théorie mécanique de la chaleur a ouvert un nouveau champ d'exploration. En 1872 la production annuelle de charbon de la Grande Bretagne était estimée à 120 millions de tonnes. Une livre de charbon ordinaire développe en brûlant un nombre d'unités de force qui représentent un quart de livre de charbon par cheval vapeur et par heure. Peu de machines aujourd'hui produisent une somme de force équivalente à un cheval à moins de deux livres et demie de charbon par heure, c'est-à-dire environ dix fois la dépense théorique. Si la nouvelle génération d'ingénieurs pouvait obtenir l'économie générale de la moitié du combustible employé pour la production de la vapeur, le gain serait énorme pour le pays ; et de même que la science télégraphique a fait d'immenses progrès par l'union étroite entre

les recherches mathématiques les plus élevées et l'expérience pratique acquise par l'observation, de même on peut espérer que lorsque les travailleurs théoriques rencontreront leurs confrères du travail pratique sur un terrain commun, tel que celui dont nous parlions, il s'ouvrira une ère nouvelle de progrès et de découvertes, ayant pour but un meilleur et plus judicieux emploi d'une des plus grandes sources de force naturelle, c'est-à-dire la provision d'énergie qui est accumulée dans les mines de charbon.

J. M. GOODEVE.

APPAREILS ET PRODUITS CHIMIQUES.

La chimie scientifique est relativement moderne; car, quoique l'homme ait méthodiquement fait des opérations chimiques depuis les temps les plus reculés, ce n'est que depuis deux siècles que l'on a commencé à grouper les divers faits découverts en un système, et que l'on a donné une explication scientifique des réactions chimiques qui avaient été observées.

Le premier art chimique fut la métallurgie: cela n'est pas douteux, car les métaux, l'or, l'argent, le cuivre, le fer, l'étain, le plomb et le mercure étaient connus des anciens. Comme l'or se trouve dans la nature presque toujours à l'état métallique, soit en masse, soit en petites parcelles mélangées au sable des rivières, il ne pouvait manquer d'attirer l'attention par son éclat et par son poids. Un hasard a certainement révélé le fait que l'or peut être fondu et que ses pailiettes peuvent se souder. L'argent aussi se trouve souvent à l'état métallique; les minéraux qui en renferment sont lourds, et pour plusieurs d'entre eux la combinaison argentifère est réduite par la chaleur seulement; ainsi l'argent fut probablement le second des métaux connus. Le cuivre se rencontre à l'état natif et plusieurs de ses combinaisons peuvent être réduites sans grande difficulté; quant au fer il ne peut s'extraire de ses minerais que par des procédés métallurgiques complexes, et en effet nous voyons par l'investigation des anciens tombeaux, etc., que ce dernier métal ne fut employé que quelque temps après le cuivre et le bronze.

Les Égyptiens semblent avoir devancé les autres nations dans

l'art de la métallurgie. Outre l'or et l'argent, le cuivre (ou l'airain), le fer, l'étain et le plomb sont mentionnés dans les livres de Moïse, tandis que pendant la guerre de Troie, donc bien longtemps après Moïse, Homère nous apprend qu'on se servait encore d'épées de bronze.

Pline, dans son "Histoire Naturelle," écrite dans le I[er] siècle, décrit très-soigneusement plusieurs substances chimiques, la manière de les obtenir, et leur application dans les arts et dans l'industrie; les pierres précieuses, le traitement des métaux, les couleurs employées en peinture, le verre, l'art de teindre, d'imprimer sur étoffes, la fabrication du savon, de l'amidon, de la bière et des poteries. Ses écrits sont pleins d'observations exactes et indiquent de persévérantes recherches. Néanmoins, ses indications sont quelquefois incomplètes, et la cause en est due peut-être à ce que, de son temps, les recherches industrielles étaient considérées comme au-dessous de la dignité d'un philosophe ou de gens haut placés, erreur qui n'a peut-être pas encore tout à fait disparu de notre société moderne. Pline mentionne encore le mercure comme étant bien connu de son temps.

Les Arabes firent progresser la chimie par le soin qu'ils apportèrent à la préparation des remèdes. Ils mêlaient diverses substances et soumettaient le mélange à l'action de la chaleur. De cette manière il se forma plusieurs corps nouveaux, et nous trouvons que Geber, au VIII[e] siècle, était au fait des divers procédés de distillation et de filtration, qu'il connaissait l'usage du bain-marie et la méthode pour purifier le sel. Il connaissait les carbonates et les nitrates de potasse et de soude, l'acide nitrique, le nitrate d'argent, le sel ammoniaque, l'eau régale et sa propriété de dissoudre l'or; il connaissait l'alun, l'acide sulfurique, le vitriol, le borax, le vinaigre distillé, le sublimé corrosif, l'oxyde de mercure, le foie de soufre, plusieurs sulfures métalliques, l'arsenic et l'arsenic blanc, ainsi que les oxydes de cuivre et de fer. Il croyait que les métaux étaient des combinaisons de mercure et de soufre en proportions différentes, et cette croyance lui fit penser qu'il serait possible par

un procédé particulier de transformer les métaux les uns dans les autres ; il fut ainsi le premier alchimiste.

L'influence des Arabes sur la chimie est rendue évidente par quelques noms encore employés, comme *alambic*, *alcali* et *alcool*, qui contiennent le préfixe arabe *al*.

À partir de Geber, jusqu'à la fin du XIVe ou le milieu du XVe siècle, il semble qu'il n'y ait eu qu'une succession d'alchimistes usant leur énergie dans la vaine recherche d'une matière qui changerait tous les métaux en or, d'un liquide qui dissoudrait toute chose, et d'un remède capable de prolonger la vie indéfiniment. Au milieu de leurs étranges expériences, ils firent cependant quelques découvertes intéressantes, mais la plupart furent décrites d'une manière si incompréhensible que le sens, s'il y en a un, en est extrêmement difficile à saisir. La croyance à la transmutation des métaux dura jusqu'à la fin du XVIIe siècle, et même en 1721, on cite encore une expérience alchimique.

De Geber à Boyle, appelé le père de la chimie moderne, on fit plusieurs découvertes isolées, mais fort importantes, et les matériaux furent ainsi préparés pour une théorie raisonnée, dont les spéculations scolastiques reculèrent l'adoption.

Vers la fin du XVIIe siècle, Stahl, qui mourut en 1734, développa d'après les suggestions de Beecher une théorie scientifique de la chimie. Ce fut la théorie du phlogistique, acceptée par les chimistes pendant près d'un siècle. D'après cette théorie tous les corps combustibles contiennent un principe particulier nommé *phlogistique*, et c'est ce principe en se dégageant qui produit la flamme. Ces chimistes montrèrent que la combustion de corps combustibles, et les transformations que subissent quelques métaux lorsqu'ils sont chauffés à l'air (calcination), sont des procédés du même ordre, et Stahl décrit quelques expériences à l'appui de sa théorie. Lorsqu'on brûle du phosphore et du soufre, il se forme des produits qui, une fois dissous dans l'eau, prennent le caractère d'acides, tandis que les métaux comme le plomb, le zinc et le fer, lorsqu'ils sont soumis à la calcination, donnent naissance

à des terres appelées *chaux*. Quant une chaux comme celle de plomb, par exemple, est chauffée avec une substance combustible telle que le charbon, le plomb est obtenu à l'état métallique ; on supposa que le phlogistique avait laissé le charbon pour s'unir à la chaux de plomb, reformant ainsi le métal original. On remarqua que presque toutes les substances combustibles étaient capables de produire cette transformation, et on employa dans le même but d'autres métaux, le fer et le zinc et d'autres combustibles, du sucre, de la tourbe et de la farine. Le procédé étant général, il était naturel de supposer que le phénomène était dû au passage du phlogistique d'un corps dans un autre. Boyle avait montré précédemment que la calcination de l'étain en augmentait le poids, ce qui paraissait contredire cette perte supposée de phlogistique pendant l'expérience ; les partisans de la théorie du phlogistique ne se tinrent cependant pas pour battus, et ils attribuèrent à leur principe subtil une pesanteur négative, ce qui expliqua le fait observé par Boyle. Ils considéraient le phlogistique comme une substance sèche de la nature des terres, puisque la plupart des substances combustibles sont insolubles dans l'eau, propriété que l'on supposait commune à toutes les terres. Plus tard on ne regarda plus l'existence séparée du phlogistique comme nécessaire à la théorie, car l'évêque Watson de Llandaff écrit : " qu'il ne faut pas s'attendre à obtenir jamais une *poignée* de phlogistique."

Les recherches sur les gaz, vers la fin du siècle dernier, exercèrent une grande influence sur la théorie de la chimie. Le terme de gaz fut employé d'abord par Van Helmont au commencement du siècle dernier ; mais bien qu'il paraisse avoir soupçonné l'existence de différentes sortes de gaz, il en confondit plusieurs sous le nom de *gaz sylvestre*, qui, dit-il, n'entretient pas la combustion, et il établit que ce gaz se forme pendant la fermentation du vin et de la bière, qu'il se produit lorsqu'on brûle du charbon à l'air et lorsqu'on dissout du marbre ou du calcaire dans du vinaigre distillé ; nous savons que c'est le gaz acide carbonique qui se forme dans ces cas-là. Mais il donne aussi le nom de gaz

sylvestre à des produits d'autres opérations qui, nous le savons maintenant, donnent des oxydes de l'azote et d'autres gaz. Environ un siècle plus tard, le Dr. Hales publia un traité sur diverses sortes d'air; enfin l'étude de la chimie des gaz fit d'importants progrès par les expériences de Black, de Cavendish et de Priestley. Black montra que la différence entre les alcalis caustiques et les alcalis faibles (carbonates) provenait de ce que ces derniers renfermaient de l'air fixe, une espèce d'air identique à celui obtenu des liquides en fermentation. La cuve pneumatique de Black ainsi que sa balance sont exposées. Cavendish montra clairement les différences qui existent entre l'air inflammable (l'hydrogène) et l'air fixe (acide carbonique). Il détermina approximativement leurs poids relativement à l'air ordinaire, décrivit plusieurs méthodes pour les obtenir, ainsi que la manière de recueillir les gaz en général et de les étudier. L'Institution Royale a envoyé la balance qui a servi à ses expériences. En 1774 Priestley (et presqu'en même temps Scheele) découvrit l'oxygène, auquel il reconnut la propriété d'entretenir la combustion et la vie mieux que l'air. On savait déjà que l'air dans lequel on avait fait brûler des matières combustibles, devenait impropre à entretenir la vie ou de nouvelles combustions; on disait de lui qu'il était *phlogistiqué*. Aussi Priestley appela-t-il son nouveau gaz *air déphlogistiqué;* l'air ordinaire étant l'intermédiaire de ces deux extrêmes. Le fait de l'inflammabilité et de la légèreté de l'air inflammable fit croire à Cavendish que c'était le phlogistique même, et il espérait qu'en brûlant de l'air inflammable dans de l'air déphlogistiqué on obtiendrait de l'air phlogistiqué. Il fit l'expérience, mais les gaz disparurent et il obtint de l'eau. Outre l'oxygène, Priestley découvrit et décrivit plusieurs autres gaz, et il améliora les instruments d'expériences. Lavoisier étudia les résultats obtenus par Priestley, et cette étude ainsi que ses propres découvertes lui firent proposer de nouvelles théories chimiques; il montra que lorsque des substances brûlent, ou qu'on calcine un métal, celles-ci se combinent avec une partie de l'air, et que le métal augmente en poids dans la même propor-

tion que l'air diminue ; donc, que bien loin de perdre quelque chose en brûlant, comme la théorie du phlogistique le voulait, les substances se combinent avec un des principes gazeux constituant l'atmosphère. Il montra aussi que lorsqu'on réduit les chaux à l'état de métal par le charbon, il se dégage un gaz identique à celui que produit le charbon en brûlant dans l'air ; donc, en fait, le charbon s'était combiné avec le principe que le métal avait auparavant pris à l'air dans la calcination. La nouvelle théorie antiphlogistique, dite aussi chimie de Lavoisier, rencontra beaucoup d'opposants ; il est vrai qu'elle n'expliquait pas la production de gaz, supposé être le phlogistique, par la dissolution d'un métal dans l'acide sulfurique ou muriatique. Au moment où il allait rechercher ce qui se produit par la combustion de l'air inflammable, il apprit que Cavendish avait obtenu de l'eau. Il répéta l'expérience en grand, et trouva approximativement que l'eau est formée de la combinaison de deux volumes d'air inflammable avec un volume d'oxygène ; il montra ensuite que si l'on fait passer de la vapeur d'eau sur du fer chauffé au rouge, il se forme de l'air inflammable et que le métal s'est transformé en chaux, chaux qui peut de nouveau être réduite par l'air inflammable, comme les autres chaux, avec production d'eau. On pouvait maintenant tout expliquer : l'hydrogène se dégage par la dissolution d'un métal dans un acide, parce que l'eau est décomposée ; il se forme une chaux qui se dissout dans les acides. Cette interprétation a été acceptée jusqu'à une date comparativement récente, car maintenant on admet que l'hydrogène provient de la décomposition de l'acide et non de celle de l'eau. Lavoisier, remarquant qu'il se produit des acides, lorsqu'on conduit dans de l'eau les produits de combustion du carbone, du soufre et du phosphore, supposa que l'oxygène était un constituant de tous les acides, d'où le nom qu'il donna à ce gaz, et qui signifie producteur d'acides. Des recherches ultérieures montrèrent qu'il existe des acides ne renfermant point d'oxygène, et que l'élément qui y est toujours renfermé est l'hydrogène. La nomenclature chimique fut changée

pour la mettre d'accord avec la nouvelle théorie, et le système publié en 1787 est resté à la base de notre système actuel.

A la même époque l'analyse chimique faisait des progrès. Ce fut Bergman à Upsal qui le premier analysa systématiquement les minéraux, et il publia ses résultats de 1777 à 1780; plus tard les procédés d'analyse furent beaucoup perfectionnés par Klaproth à Berlin et par Berzélius. Gahn, sur les conseils de Bergman, commença ses recherches sur l'emploi du chalumeau. De fait, l'analyse consciencieuse des minéraux a amené la découverte de plusieurs nouveaux éléments, et de nombreux chimistes ont perfectionné jusqu'à nos jours les méthodes d'analyse.

L'application de l'électricité à la décomposition de substances chimiques amena la découverte faite par Davy des métaux alcalins, le potassium, le sodium, le lithium, ainsi que du baryum, du strontium, du calcium, et du magnésium, et quoiqu'il ne réussît pas à décomposer l'alumine, la glucine, l'yttria, la zircone, on admit cependant que ces corps étaient des oxydes métalliques, ce qui plus tard fut prouvé. Davy montra aussi que le chlore est un élément, et la découverte postérieure de l'iode et du brome, ainsi que celle des acides que ces éléments forment par leur combinaison avec l'hydrogène, montra l'erreur dans laquelle était tombé Lavoisier, qui croyait que l'oxygène était le seul élément qui par sa combinaison avec d'autres éléments pouvait donner naissance à des corps doués de propriétés acides. La balance qui appartient à la "Royal Institution," et qui servit à Young, Davy et Faraday, se trouve dans la collection.

En 1699 déjà, Homberg montrait que des quantités égales d'un même alcali demandaient des quantités différentes d'acides divers, pour être complètement neutralisées; ces résultats à cette époque attirèrent peu l'attention, et même lorsque en 1777 Wenzel publia ses expériences, où il déterminait exactement les proportions dans lesquelles deux sels neutres se décomposent mutuellement en donnant naissance à deux nouveaux sels neutres, l'esprit des chimistes était tellement occupé par la discussion des théories

phlogistiques et antiphlogistiques, qu'on ne prit pas garde à son travail. Le fait cependant, que beaucoup de chimistes s'occupaient de rechercher la composition exacte des sels, prouve qu'ils croyaient à la constance de composition des substances chimiques. En 1804 Dalton proposa d'expliquer l'uniformité de composition, en admettant que les corps simples sont constitués par de petites particules indivisibles ou *atomes*, et que les corps composés sont formés par l'union d'atomes divers. Cette idée lui vint en étudiant deux combinaisons de carbone et d'hydrogène, nommées gaz oléfiant et gaz des marais ; il reconnut que ce dernier renfermait par rapport au premier le double d'hydrogène pour une même quantité de carbone ; il supposa par conséquent que le gaz oléfiant était composé d'un atome de carbone et d'un d'hydrogène, tandis que le gaz des marais était la combinaison d'un atome de carbone avec deux d'hydrogène. Une intéressante collection d'instruments employés par Dalton, et fabriqués par lui-même pour la plupart, est exposée par la "Literary and Philosophical Society" de Manchester.

En 1808 Gay-Lussac montra que, lorsque des gaz se combinent entre eux, il existe une relation simple entre le volume des constituants et le volume du produit mesuré sous la forme de gaz ou de vapeur. Ainsi, deux volumes d'hydrogène se combinent avec un volume d'oxygène pour former deux volumes de vapeur d'eau, et deux volumes d'ammoniaque consistent en un volume d'azote combiné avec trois volumes d'hydrogène. Ces singularités sont maintenant expliquées par la théorie dynamique des gaz, qui conduit à la conclusion, que des volumes égaux de différents gaz renferment des nombres égaux de molécules. Ces molécules peuvent être composées d'atomes d'un seul corps simple ou de plusieurs.

La constitution de la matière a été fort élucidée par l'étude des combinaisons organiques, provenant du règne végétal ou du règne animal. Beaucoup d'entre elles étaient connues anciennement, mais ce n'est qu'en 1811 que Gay-Lussac et Thénard

essayèrent d'en faire des analyses exactes ; Berzélius, de Saussure et Prout modifièrent leurs procédés, et enfin Liebig inventa la méthode actuelle qui ne laisse rien à désirer.

La théorie atomique prit beaucoup de vraisemblance par la découverte de Gay-Lussac, en 1815, du cyanogène, un gaz formé de carbone et d'azote, doué de plusieurs propriétés semblables à celles du chlore. En effet le potassium brûle dans le cyanogène en donnant du cyanure de potassium, comme dans le chlore, avec lequel il forme du chlorure de potassium. La découverte de ce *radical composé*, comme on l'appelait, fut suivie en 1842 de celle du cacodyle par Bunsen, du butyle par Kolbe en 1847, du méthyle, de l'éthyle et de l'amyle par Frankland en 1849.

L'analyse organique montra bientôt qu'il existait plusieurs combinaisons ayant exactement la même composition, mais différant par leurs propriétés ; par exemple, les essences de térébenthine, de rose et de citron sont des corps renfermant les mêmes éléments dans les mêmes proportions, quoiqu'ils diffèrent par leurs propriétés. Dans quelques cas on explique ces différences par le fait que les molécules de ces corps contiennent un nombre différent d'atomes, auquel cas on dit de ces substances qu'elles sont *polymères ;* cependant souvent les molécules renferment le même nombre d'atomes : on dit alors qu'elles sont *isomères*, ou plus spécialement *métamères* les unes des autres, ce qui se reconnaît à une densité égale. L'explication qu'on donne de l'isomérie en général, c'est que dans les différentes molécules les atomes sont *groupés* différemment.

Jusqu'en 1828, où Wöhler obtint artificiellement de l'urée, on croyait que les substances organiques ne pouvaient se produire que grâce à la force vitale d'une plante ou d'un animal ; mais depuis lors on a réussi à produire synthétiquement un grand nombre de substances, et ces synthèses ont montré que les propriétés des substances obtenues variaient suivant le mode de préparation ; les causes qui influent le plus sont le degré de la température à laquelle les corps réagissent les uns sur les autres, la

pression, la masse, le degré de division des substances, etc. Une des plus belles synthèses de ces dernières années est celle de l'alizarine, le principe colorant de la garance, qui est due à Græbe et Liebermann ; elle date de 1869.

Les recherches de Gerhardt et de Williamson sur les combinaisons organiques renfermant de l'oxygène, et celles de Wurtz et de Hofmann sur les combinaisons organiques renfermant de l'azote, ont conduit à la théorie des types, les premières se rapportant à l'eau, les secondes à l'ammoniaque, par la substitution de radicaux ou groupes d'atomes de carbone et d'hydrogène, à un ou plusieurs hydrogènes du type. Ainsi Hofmann a montré que dans l'ammoniaque Az H_3, on pouvait remplacer tous les hydrogènes par d'autres éléments ou par des radicaux, et que l'azote lui-même pouvait être remplacé par du phosphore, de l'arsenic, ou de l'antimoine ; que dans le chlorure d'ammonium, non-seulement l'hydrogène et l'azote pouvaient être remplacés, mais encore que le brôme ou l'iode pouvaient se substituer au chlore et donner naissance à des corps possédant les propriétés caractéristiques de ceux dont ils dérivent. Tous ces résultats indiquent une similarité de construction, et la théorie atomique, plus récente que la théorie typique, au moins dans ses développements, a encore jeté un jour nouveau sur tous ces faits. Frankland en 1852, dans un travail intitulé "A New Series of Organic Bodies containing Metals," publié dans les "Philosophical Transactions," a le premier indiqué qu'il y avait une limite dans la faculté des éléments ou des groupes d'éléments de se combiner entre eux. Avant que cette limite soit atteinte, le corps n'est pas *satisfait*, il peut encore s'assimiler par addition d'autres atomes, et alors il devient *saturé*. Cette doctrine de l'atomicité a été étendue par Kolbe aux carbures, et généralisée ensuite par Kékulé ; elle permet de donner maintenant la constitution atomique d'un grand nombre de substances. Plusieurs chimistes, entre autres Frankland, ont reporté cette théorie sur la chimie minérale, et les résultats obtenus présentent une remarquable régularité, surtout

depuis que les poids atomiques des éléments ont été mis dans une relation simple avec leurs chaleurs spécifiques. Il ne faudrait pas croire cependant que le système adopté soit parfait et complet; l'équation

$$2\ H_2 + O_2 = 2\ O\ H_2$$

montre que 4 vol. d'hydrogène se combinant avec 2 vol. d'oxygène donnent naissance à 4 vol. de vapeur d'eau, et aussi que 4 parties en poids d'hydrogène se combinant avec 32 parties en poids d'oxygène forment 36 parties d'eau; mais ce que la formule n'exprime pas, c'est la force qui se développe dans cette réaction sous forme de chaleur; chose curieuse, la théorie phlogistique l'indiquait, mais elle n'indiquait que cela. Aussi la représentation vraie de l'action chimique pourra-t-elle être probablement notée, suivant l'idée mise en avant par le professeur Crum Brown, en combinant la théorie atomique avec la théorie phlogistique, si du moins nous substituons à ce dernier terme celui d'énergie potentielle.

En parcourant les travaux des anciens chimistes, on est frappé de l'emploi fréquent qu'ils faisaient des hautes températures; ils chauffaient des mélanges pendant des jours, des mois et mêmes des années entières dans des fours décrits minutieusement; il faut dire qu'ils étudiaient surtout les métaux en cherchant la pierre philosophale. De nos jours l'usage du gaz comme combustible, et le courant qui entraîne les chimistes à s'occuper de chimie organique, ont détourné les yeux des réactions à hautes températures, mais il faut espérer qu'avec l'invention des fours à gaz, dus entre autres à M. Perrot de Genève, et celle qui suivra bientôt, espérons-le du moins, d'un thermomètre simple pour températures élevées, on se servira davantage de ce moyen d'étude.

Poids spécifiques des Gaz et des Vapeurs.

La relation étroite qui existe entre le poids moléculaire d'un gaz et son poids spécifique rend très-importante la détermination de

la densité des gaz ou des vapeurs de substances liquides ou solides volatiles, cette détermination permettant aux chimistes de donner la composition exacte des corps qu'ils étudient. Si l'on a à faire à un gaz, trois méthodes peuvent être employées pour obtenir sa densité.

La plus exacte est celle de Regnault; ce savant employait un ballon, d'environ dix litres de capacité, qui pouvait être mis en connexion avec une pompe pneumatique et avec un réservoir renfermant le gaz soumis aux recherches; entre le réservoir et le ballon se trouvait un appareil pour dessécher complètement le gaz. Après avoir entouré le ballon de glace il faisait le vide, puis laissait entrer le gaz, opération qu'il répétait plusieurs fois, de façon à ce que le gaz ne soit plus mélangé d'air. Le ballon une fois rempli, le robinet fermé et la pression du gaz mesurée, on porte le ballon sur une balance, et on suspend un ballon de même dimension faisant à peu près contrepoids à l'autre bassin. Après la pesée, le ballon est de nouveau refroidi par la glace, vidé autant que possible au moyen de la pompe, la pression mesurée, puis pesé de nouveau. La différence entre les deux pesées donne un nombre qui permet de calculer le poids du gaz contenu dans le ballon. Les mêmes opérations sont ensuite renouvelées avec le gaz type (l'hydrogène ou l'air), et avec les résultats obtenus on calcule facilement le poids spécifique.

Le procédé est délicat, mais très-exact; une autre méthode plus simple, plus rapide et pourtant donnant des résultats assez exacts pour la plupart des cas, est celle de Bunsen.

Un troisième procédé dû à Bunsen, est basé sur la découverte de Graham, que la vitesse d'effusion d'un gaz au travers d'un petit trou percé dans une plaque métallique est inversément proportionnelle à la racine carrée de son poids spécifique; la méthode consiste à observer combien de temps il faut à un volume donné du gaz pour s'échapper au travers d'un très-petit trou percé dans une feuille de platine.

On emploie généralement la méthode de Gay-Lussac quand on

veut déterminer la densité de vapeur d'un solide volatil : on introduit une petite ampoule renfermant un poids déterminé de la substance dans un tube gradué plein de mercure, et renversé sur une cuve à mercure ; on enveloppe ce tube d'un manchon rempli d'eau ou d'huile et on chauffe le tout ; quand la température a été élevée au degré voulu et qu'elle est partout uniforme, on lit sur le tube le volume qu'occupe la vapeur du corps dont on cherche la densité, et on la calcule par la méthode ordinaire.

Une modification a été apportée à ce procédé par Hofmann en 1868 ; il emploie un tube gradué d'un mètre de longueur rempli de mercure et renversé sur une cuve de mercure ; une quantité connue de substance renfermée dans un petit flacon est introduite dans le tube, qui est enveloppé d'un tube plus large, dans lequel on fait arriver des vapeurs d'alcool, d'eau ou d'aniline, suivant la température que l'on veut obtenir ; on lit le volume de la vapeur dans le tube et on calcule comme à l'ordinaire la densité. Cette méthode a cet avantage que la volatilisation de la substance se produit à une température plus basse, grâce à la moindre pression du mercure.

Dans le procédé de Dumas, on introduit une quantité inconnue dans un ballon d'une capacité connue se terminant par une pointe effilée ; ce ballon est plongé dans un liquide chauffé, et quand l'excès des vapeurs s'est dégagé, on ferme la pointe du ballon au chalumeau, puis après refroidissement on le pèse, d'où on déduit la quantité de substance dont la vapeur le remplissait au moment de la fermeture. Mais cette méthode ne donne des résultats aussi exacts que celle de Gay-Lussac qu'à condition que la substance soit très-pure.

Deville et Troost, en remplaçant le ballon en verre par un ballon en porcelaine, qui était alors chauffé par les vapeurs de mercure, de soufre, de cadmium ou de zinc, ont réussi à déterminer la densité de vapeurs de plusieurs substances à point d'ébullition élevé, ce qui avait un grand intérêt.

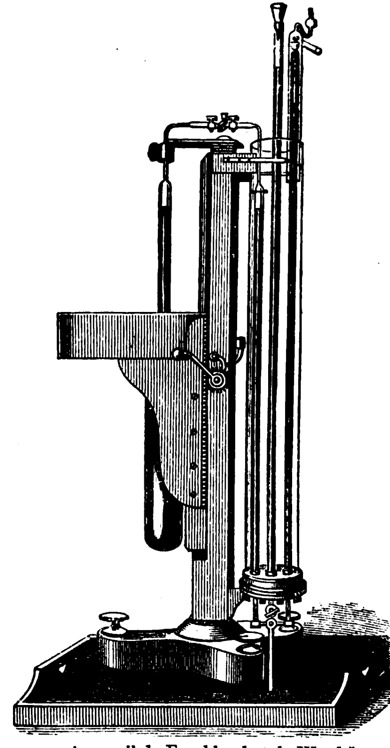
En 1873 Dewar et Dittmar, en se servant d'un ballon en fer, ont déterminé approximativement par la même méthode la densité de vapeur du potassium.

Analyse des Gaz.

L'analyse des gaz a été fort perfectionnée ces dernières années, et on est arrivé à un degré d'exactitude qui ne laisse rien à désirer. Le but poursuivi par les premiers analystes était de déterminer la salubrité de l'air, qu'on croyait devoir dépendre dans les différentes localités des proportions de ses constituants, aussi la méthode était-elle appelé *eudiométrie*, ou mesure de la pureté de l'air. Les premiers essais furent faits par le Dr. Hales, et son procédé est décrit dans son ouvrage "Vegetable Staticks," publié en 1727. Fontana en 1770, Priestley en 1774, et Cavendish un peu plus tard, employaient de l'air nitreux (oxyde azotique) pour absorber l'oxygène d'un volume d'air donné; Scheele employait une dissolution *d'hépar sulfuris* (foie de soufre), et Guyton de Morveau un fragment de sulfure de potassium. Séguin se servait de phosphore à chaud, et Berthollet à froid. Volta le premier combina l'oxygène avec l'hydrogène au moyen de l'étincelle électrique, Ure perfectionna cette méthode, qui est maintenant adoptée comme la plus exacte; enfin Döbereiner combinait ces deux gaz au moyen de l'éponge de platine. D'autres gaz que l'air furent analysés par Hope, Henry et Pepys, etc., mais c'est Bunsen qui a le plus développé ce sujet.

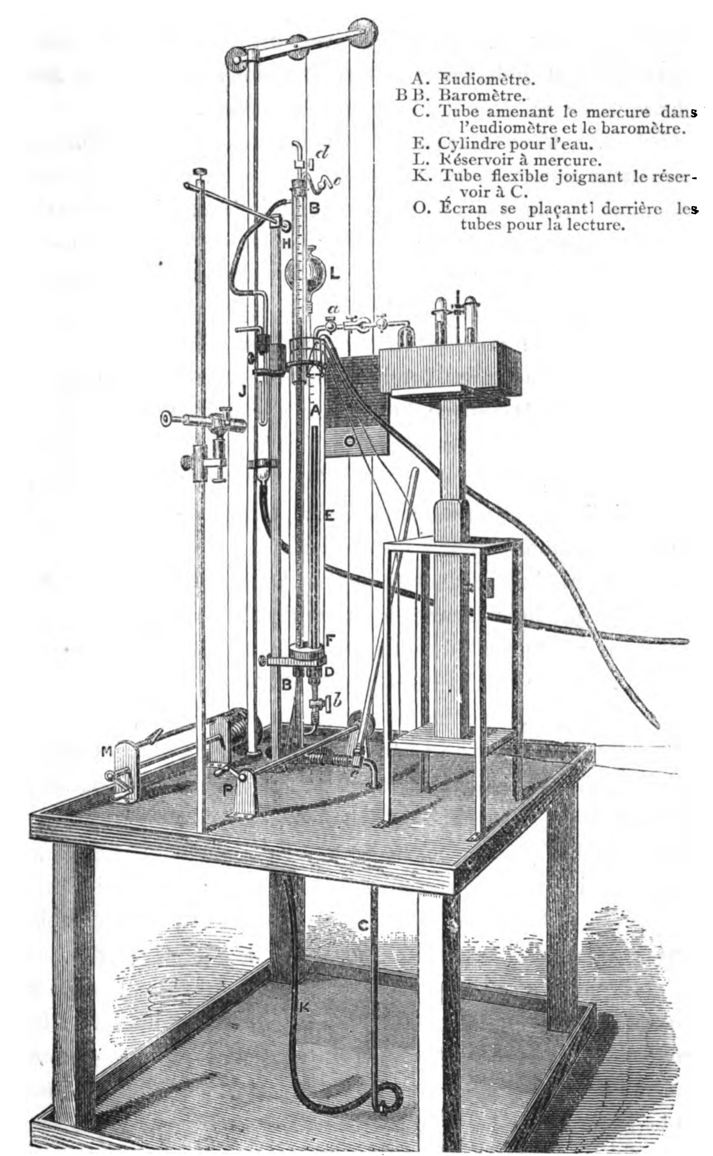
Bunsen emploie un appareil composé de deux pièces principales: un tube d'absorption d'environ 250^{mm} de longueur sur 20^{mm} de diamètre, et un eudiomètre long de 500^{mm} à 800^{mm} et d'à peu près la même largeur que le précédent; la partie supérieure est traversée par deux fils de platine permettant à l'étincelle électrique de faire détoner le mélange. La graduation part de la partie supérieure du tube. Le second tube dont il se sert est destiné à l'absorption des gaz par des réactifs solides qu'on introduit dans le tube sous forme de petites boulettes fixées à un fil de platine; le gaz

étant mesuré avec soin avant et après l'introduction de ces petites boules. Il faut de grandes précautions pour déterminer la température et la pression du gaz au moment où on le mesure; aussi se sert-on d'un cathétomètre pour lire à distance la hauteur du mercure dans le tube, et il faut ne faire la lecture que longtemps après les manipulations; l'absorption d'un des constituants au moyen de solides demande aussi beaucoup de temps. Pour accélérer l'analyse, Regnault et Reiset inventèrent un appareil qui a été encore perfectionné par Frankland et Ward: le tube gradué est entouré d'une grande quantité d'eau de façon à ce que la température reste constante, et l'absorption est produite au moyen de liquides dans le *tube laboratoire*, qui communique avec l'eudiomètre par un tube capillaire muni de robinets. Par cette méthode l'absorption se fait en cinq minutes environ, et la lecture peut être faite aussitôt qu'on a ramené le gaz au volume voulu dans l'eudiomètre; celui-ci est pourvu de fils de platine, de sorte que les explosions ont lieu dans un vase tout entouré d'eau, et l'on ne perd point de temps avant la lecture. Comme, dans l'appareil de Frankland et de Ward,



Appareil de Frankland et de Ward.*

* Cette figure et les deux suivantes sont extraites de l'ouvrage de Sutton intitulé "Analyse Volumétrique."



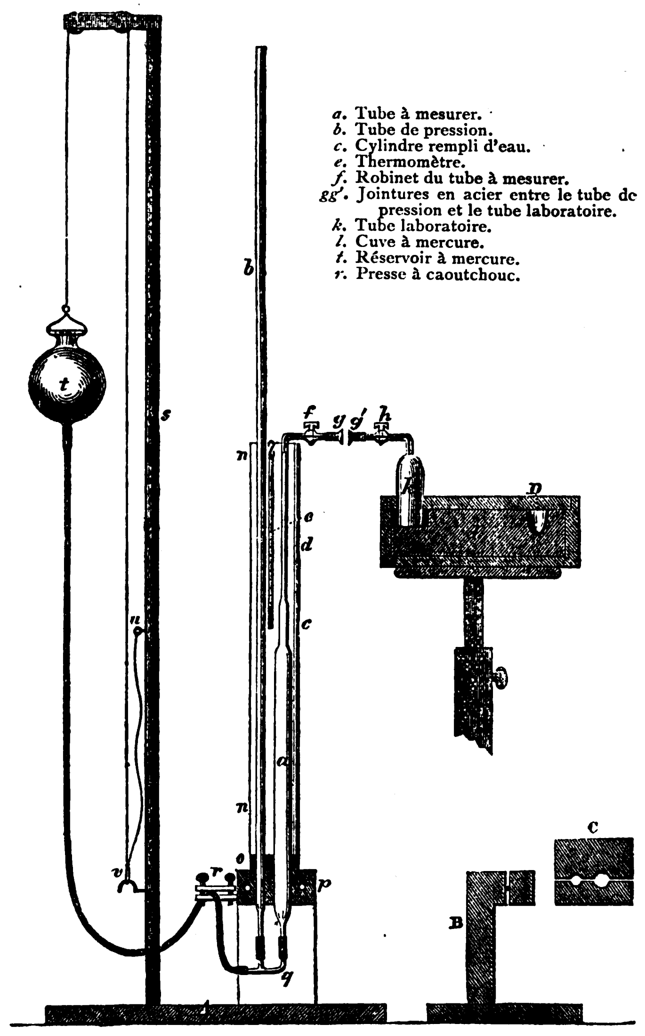
Appareil de Mc Leod.

l'eudiomètre est en connexion avec un baromètre, la mesure du volume est indépendante des variations de pression atmosphérique, ce qui simplifie beaucoup les calculs.

McLeod a décrit un appareil analogue quelque peu modifié; plus récemment encore, Russel a publié qu'il se servait d'eudiomètres ordinaires entourés d'un cylindre rempli d'eau. Les corrections pour les changements de température et de pression peuvent être négligées par le fait qu'il emploie un tube de même capacité que l'eudiomètre renfermant de l'air, qui avant chaque mesure est amené au même volume en montant ou descendant le tube dans la cuve à mercure; l'eudiomètre est ensuite levé ou abaissé jusqu'à ce que la surface de mercure y soit à la même hauteur que dans le tube à pression, et on fait la lecture. Les réactifs liquides sont introduits au moyen d'une petite pompe refoulante, et lorsque l'absorption est terminée on les enlève au moyen d'un tampon de coton attaché à un fil d'acier.

Dans la méthode d'analyse des eaux, de Frankland et d'Armstrong, les produits gazeux de la combustion des matières organiques du résidu sont mesurés et analysés dans un appareil très-simple, analogue à celui de Regnault et Reiset.

Parmi les appareils et les substances employés dans les recherches chimiques et exposés à l'Exposition actuelle, les plus intéressants et les plus importants sont: tous les appareils employés par le Dr. Andrews et le professeur Tait dans leurs études sur la nature et les propriétés de l'ozone, celui de Soret à l'aide duquel il a déterminé la constitution de ce corps, ainsi que ceux de sir Benjamin Brodie. Le professeur Roscoe expose une grande collection des combinaisons du vanadium, corps simple qu'il a étudié à fond, avec beaucoup de profit pour la théorie chimique. Le Dr. Frankland et M. Perkins envoient un grand nombre de substances obtenues dans leurs recherches; nous mentionnerons surtout celles qui se rapportent à la synthèse de la coumarine par M. Perkins. Un nombre considérable de corps obtenus à l'université d'Édimbourg par le professeur Crum-Brown, le Dr. Letts et leurs élèves dans leurs travaux sur les



Petit Apparcil de Frankland.

produits d'addition du sulfure de méthyle, des hyposulfites, etc., sont aussi exposés. Les membres de la société de chimie allemande à Berlin se sont réunis pour faire une exposition collective de substances organiques et inorganiques, qui présente un grand intérêt.

Les grandes industries anglaises sont bien représentées. Le professeur Roscoe expose les plans d'installation d'une fabrique d'alcalis; le procédé de M. Weldon pour la préparation du chlore dans la fabrication du chlorure de chaux est illustré par des planches, ainsi que par des échantillons indiquant les différentes phases de la fabrication. M. Deacon aussi a envoyé un modèle de son appareil à préparer le chlore au moyen des gaz qui s'échappent des fours à sulfate de soude. MM. Hutchinson et Cie., Gaskell, Deacon et Cie., Sullivan et Cie. exposent divers produits de leurs fabriques d'alcalis. On voit encore des échantillons de soufre extraits des résidus de la fabrication de la soude d'après le procédé de Mond, exposés par MM. Hutchinson. La "Widnes Metal Company" extrait du cuivre et de l'argent des pyrites grillées ayant servi à la fabrication de l'acide sulfurique. MM. Gossage et fils exposent des silicates alcalins, et M. Spence une série d'échantillons provenant de la fabrication de l'alun au moyen des schistes.

Les couleurs d'aniline, et en général toutes celles dérivant du goudron de houille, sont représentées par un grand nombre d'échantillons exposés; la mauveine et ses sels par M. Perkins, les rouges, bleus, violets, et verts par MM. Brooke, Simpson et Spiller.

H. Mc Leod.

INSTRUMENTS MÉTÉOROLOGIQUES.

TOUT observatoire météorologique complet doit enregistrer des observations sur les phénomènes suivants :

Pression atmosphérique.
Température de l'air.
Humidité de l'air.
Quantité de pluie.
Évaporation.
Mouvements de l'atmosphère (vents).

D'autres phénomènes attirent aussi parfois l'attention des observateurs ; ce sont par exemple :

L'électricité atmosphérique.
L'ozone.
La pesanteur spécifique de l'eau de mer (branche de la météorologie maritime).

Ces différents objets vont être passés en revue dans l'ordre dans lequel ils viennent d'être énumérés. A peine est-il besoin de faire remarquer que cette liste est loin d'épuiser le catalogue des observations qui doivent rentrer dans une étude vraiment complète du temps.

Des séries d'instruments plus ou moins complètes, destinées à montrer le mode d'installation de chaque station, ont été exposées par l'Observatoire physique central de St. Pétersbourg, par l'Office météorologique et par la Société météorologique d'Angleterre.

Q 2

Pression atmosphérique.

C'est le baromètre qui sert partout à l'étude de cette donnée physique. Torricelli inventa cet instrument en 1643 ; c'est Boyle qui, dit-on, lui donna son nom. Sous sa forme la plus simple, le baromètre consiste en un tube de verre d'environ 34 pouces de long, fermé à un bout et rempli de mercure ; l'extrémité ouverte plonge dans un vase également plein de mercure appelé la cuvette. La colonne mercurielle se maintient à Londres à une hauteur qui varie suivant l'état de l'atmosphère entre 28 et 31 pouces au dessus du niveau du mercure dans la cuvette. Le baromètre étalon de Kew n'est pas construit autrement. La hauteur de la colonne est mesurée en général au moyen d'une échelle appliquée le long du tube. Dans les observations scientifiques, on emploie plutôt le Cathétomètre, instrument formé d'une lunette horizontale mobile le long d'une règle verticale graduée. La lunette, soigneusement ajustée au moyen de vis micrométriques, est successivement dirigée sur le sommet et sur la base de la colonne. La différence des deux lectures donne naturellement la hauteur cherchée.

Les baromètres employés habituellement se classent en deux grandes catégories. Nous ne parlons ici que des véritables baromètres à mercure, laissant de côté tous ceux qui sont montés dans des cadres de bois, etc., comme impropres aux observations précises, ainsi que cela a été exposé dans les "Instructions pour l'Emploi des Instruments météorologiques," p. 12.

Nous distinguerons donc—

A, les Baromètres à cuvette ; et B, les Baromètres à siphon.

A. Au point de vue de la mesure de la colonne, les premiers offrent une difficulté qui dérive de leur construction même : l'instrument renferme une quantité définie de mercure, et lorsque celui-ci baisse dans le tube, il doit forcément monter dans la cuvette et *vice-versâ ;* et comme la hauteur de la colonne se mesure au-dessus du niveau dans la cuvette, il est impossible de l'apprécier

exactement au moyen d'une échelle fixe. Dans les baromètres à siphon, cette difficulté n'existe pas; le mercure passe de la longue branche dans la courte, ou *vice-versâ;* c'est la différence de longueur des deux colonnes qui donne la hauteur cherchée.

1. Dans les baromètres ordinaires à cuvette close, l'échelle donne pour une certaine hauteur un résultat parfaitement exact; c'est ce qu'on appelle le *point neutre.* On calcule le rapport des sections du tube et de la cuvette. Cette donnée permet de calculer ce qu'on appelle la "correction de capacité," qu'on applique aux lectures de l'échelle, suivant que le niveau se trouve au-dessus ou au-dessous du point neutre.

2. Dans les baromètres de Fortin (les plus employés en Angleterre comme instruments étalons, et dont plusieurs modèles sont exposés), l'échelle est fixe, et son extrémité inférieure, zéro de la graduation, est visible dans la cuvette; elle est formée d'une pointe d'ivoire. Le niveau du mercure doit être avant chaque observation ramené au contact de cette pointe. On y parvient au moyen d'une vis de pression agissant sur le fond de la cuvette, qui est formé d'une substance flexible, mais imperméable au mercure, telle que le cuir. Cette construction permet de mesurer directement la hauteur de la colonne.

3. On a adopté un principe complètement différent dans les baromètres de marine (c'est-à-dire dans l'instrument de Kew construit par P. Adie en 1854, et recommandé la même année par le comité de l'Association Britannique à la Chambre du Commerce). L'échelle est fixée à l'instrument, mais au lieu de pouces de longueur vraie, elle porte des pouces qui vont en se raccourcissant du haut de l'instrument vers le bas, proportionnellement aux diamètres respectifs du tube et de la cuvette.

Ces baromètres doivent être essayés dans un réservoir (vacuomètre) dans lequel la pression peut être augmentée ou diminuée. On les place à côté d'un instrument étalon, et l'on fait la lecture de tous les deux au moyen d'un cathétomètre, sous des pressions variant de 27 à 31 pouces. L'écart est noté de demi-pouce en

demi-pouce; il comprend naturellement à la fois la correction de capacité, celle de la graduation de l'échelle, etc.

Les baromètres de marine offrent une particularité de construction qui n'est pas apparente, mais qui les rend moins sensibles à de brusques changements de pression que les instruments employés sur terre ferme. Le roulis du vaisseau ferait, dans un tube ordinaire, osciller la colonne de mercure d'une manière qui, parfois, rendrait la lecture très-difficile. Pour en diminuer l'effet une partie du tube est effilée en une pointe capillaire; la partie supérieure, qui seule offre le plein diamètre, est très-courte, et il y a, de cette façon, moins de mercure exposé à l'action du roulis. A l'usage, ces instruments (qui ont bien répondu au but spécial que l'on cherchait) ne se sont point montrés trop peu sensibles sur terre; aussi ce mode de construction est-il chaque jour plus employé, à cause des grands avantages qu'il offre comparé au système Fortin, surtout au point de vue du transport et de la lecture.

Des baromètres de Kew sont exposés par Adie.

B. Les baromètres à siphon construits d'abord par Boyle, puis perfectionnés par De Luc et par Gay-Lussac, sont fréquemment employés sur le Continent comme instruments étalons et pour les stations de montagne. Les nouveaux baromètres à siphon employés en Russie figurent à l'Exposition. Ces instruments doivent être munis d'une double échelle, puisque le niveau du mercure doit être noté dans les deux branches. Le fait que les deux lectures se font de la même manière, ce qui n'est pas le cas pour le baromètre Fortin, est un grand avantage de ce modèle de baromètre étalon.

Chaque baromètre porte avec lui un thermomètre qui donne la température exacte du mercure à chaque lecture.

Nous avons parlé plus haut de "cuvette close;" cette expression demande un mot d'explication. On a remarqué que, dans des cuvettes couvertes en bois, la pression se fait sentir à travers les pores sur la surface du mercure. Si la cuvette est construite

en fer, on y ménage un petit trou fermé par un disque de peau perméable à la pression.

Instruments enregistreurs.—C'est tantôt par la photographie, tantôt par l'électricité, tantôt par des procédés mécaniques, que les baromètres peuvent être rendus enregistreurs; ils reçoivent alors, en général, le nom de *barographes.*

La photographie donne un enregistrement continu; elle est employée à Kew et à Greenwich. Dans le premier de ces observatoires, un appareil photographique prend incessamment l'image de l'espace vide au sommet du tube d'un baromètre à cuvette. L'instrument original, imaginé par sir F. Ronalds, est exposé. A Greenwich, M. Charles Brooke a établi un baromètre à siphon dont les oscillations sont enregistrées par la photographie d'un flotteur reposant sur le mercure de la branche ouverte.

L'électricité, qui a été fréquemment employée, ne donne qu'un enregistrement intermittent. En général, un fil métallique pénètre à intervalles réguliers dans la branche ouverte d'un baromètre à siphon, jusqu'à ce qu'il touche la surface du mercure. Ce contact permet le passage d'un courant électrique qui produit une marque sur un papier enregistreur. Cette méthode, recommandée d'abord par sir Charles Wheatstone, est employée, avec certaines modifications, par le docteur Theorell à Upsal et par le professeur Van Rysselberghe à Ostende. Ce dernier observateur a exposé son météorographe complet, qui enregistre à la fois tous les éléments météorologiques et la hauteur de la marée.

Les barographes mécaniques donnent également un enregistrement intermittent. Le système le plus simple est celui de sir A. Milne, dans lequel l'enregistrement est produit par une pointe attachée à un flotteur déposé dans la branche ouverte d'un baromètre à siphon. Un mouvement d'horlogerie la fait pénétrer à intervalles réguliers dans une bande de papier.

Le premier barographe mécanique a été construit en 1766 par Alexandre Cumming, et son instrument, appelé "baromètre-hor-

loge," est devenu la propriété de M. Luke Howard, qui l'a employé à ses observations depuis 1815.

Les baromètres anéroïdes et métalliques fréquemment employés pour prédire le temps, n'ont pas, comme instruments scientifiques, la même valeur que les autres. La pression est mesurée au moyen d'une boîte métallique à parois minces, hermétiquement fermée, dans laquelle le vide a été fait en partie. Suivant que la pression augmente ou diminue, l'air enfermé dans la boîte est comprimé ou dilaté, et la forme de l'appareil se modifie. Ces mouvements de l'enveloppe sont transmis à une aiguille placée sur un cadran ou enregistrés directement. C'est Vidi qui a eu le premier l'idée de la construction de ces appareils; MM. Goldschmidt, de Zurich, en ont exposé ici plusieurs modèles.

La principale objection qu'on peut faire aux baromètres anéroïdes comme instruments scientifiques vient de ce que, chez eux, tout repose sur une construction parfaite de la boîte; or celle-ci, de même que tous ses agencements intérieurs, est en métal et par conséquent sujette à s'altérer par oxydation ou autrement. Elle risque aussi d'être dérangée par des secousses brusques comme celles que l'instrument peut éprouver en voyage. Il faut donc, pour pouvoir employer utilement un anéroïde, le comparer aussi souvent que possible avec un baromètre à mercure, seul moyen de découvrir les erreurs de ses indications.

Température.

Ce sont les thermomètres, dont l'invention remonte à Galilée, qui sont employés pour déterminer la température. Cet instrument consiste en un tube de verre muni d'une boule à une extrémité et renfermant une certaine quantité de liquide. On a employé d'abord l'alcool; en 1695 Halley proposa le mercure, qui a été généralement adopté, sauf pour les thermomètres destinés à des températures très-basses.

Le meilleur instrument pour la mesure exacte de la température est le thermomètre à air, dans lequel une certaine quantité d'air

est renfermée dans un ballon communiquant avec un long tube permettant la détermination du volume de l'air.

On n'est pas bien d'accord sur la meilleure exposition à donner aux thermomètres pour obtenir la véritable température de l'air ambiant. On trouvera à l'Exposition différents modèles de cages et d'écrans que l'on dispose actuellement autour des thermomètres destinés à cet usage.

Le principal perfectionnement introduit depuis quelques années dans la construction des thermomètres consiste dans la graduation gravée sur le tube lui-même. Il est évident que la graduation sur une plaque séparée n'offre pas de garanties que l'échelle soit bien celle qui doit être adaptée à l'instrument.

On a construit différents modèles de thermomètres enregistreurs. L'un des plus anciens, celui de Six, enregistre à la fois les températures maximum et minimum. C'est un thermomètre à esprit de vin et à deux boules dont la plus petite est en partie pleine d'air. Le tube est en forme d'U, et le coude est occupé par du mercure séparant l'esprit de vin en deux parties. Les degrés atteints sont indiqués par des index de fer qui sont mis en mouvement lorsque la colonne de mercure se déplace ; on les ramène à leur position au moyen d'un aimant.

Des instruments construits sur ce modèle ont été employés par Negretti, puis par Casella (à l'instigation du professeur W. A. Miller), pour les observations dans les eaux profondes. Les boules sont alors enfermées dans une enveloppe de verre partiellement remplie d'un liquide (mercure dans le thermomètre de Negretti et esprit de vin dans celui de Miller) ; elles sont ainsi mises à l'abri des changements de forme que leur feraient éprouver les fortes pressions aux grandes profondeurs, et qui altéreraient les indications de l'appareil.

Les thermomètres à maximum sont construits en Angleterre d'après le système de Phillips ou d'après celui de Negretti. Dans le premier, l'index est un fragment de la colonne mercurielle, séparé du reste par une petite bulle d'air. Dans le second, le tube

est étranglé à la sortie de la boule de telle façon que le mercure, poussé en avant par l'action de la chaleur, ne puisse pas, par sa propre cohésion, retourner en arrière et rentrer dans le réservoir.

Le thermomètre à minimum le plus employé est celui de Rutherford; il est rempli d'alcool, et l'index est en émail et submergé dans le liquide. Lorsque celui-ci recule, l'index est entraîné ; lorsque, au contraire, il avance, l'index reste en place ; le point le plus bas atteint est ainsi indiqué.

Le thermomètre à minimum de Casella est à mercure et muni d'une chambre latérale. Lorsque l'instrument est mis en place, cette chambre est vide ; si la température s'élève, le mercure entre plus facilement dans la chambre que dans le tube lui-même ; tandis qu'au contraire, si elle s'abaisse, le mercure rentre dans la boule. L'extrémité de la colonne mercurielle dans le tube indique par conséquent la température la plus basse qui a été atteinte.

L'électricité et la photographie peuvent être employées dans les thermomètres enregistreurs comme pour les baromètres. A Kew, la colonne mercurielle est interrompue par une bulle d'air dont la position est photographiée. A Greenwich, on prend l'image du vide qui occupe la partie supérieure du tube.

L'emploi de l'électricité dans les thermographes exige que les tubes soient ouverts ; l'arrangement est semblable à celui que nous avons décrit en parlant des baromètres.

Les instruments destinés à apprécier l'intensité de la radiation solaire sont des thermomètres à maximum, dans lesquels la boule et une portion du tube sont revêtues de noir de fumée, puis enfermées dans une enveloppe de verre, où le vide a été fait aussi complètement que possible. Pour apprécier le degré du vide, Negretti introduit dans l'appareil une éprouvette barométrique à mercure. Hicks soude des fils de platine à l'appareil et apprécie le degré de vide par un courant électrique.

Humidité.

Le degré d'humidité de l'atmosphère est mesuré au moyen de l'hygromètre, directement ou indirectement. Parmi les hygromètres directs, citons celui de Daniell (exposé par M. Symons) et celui de Regnault. Le premier de ces appareils consiste en deux boules reliées par un tube ; l'une est en verre noirci et renferme un thermomètre, l'autre est en verre transparent et est enveloppée de mousseline. On introduit de l'éther dans l'appareil avant de le sceller. Pour faire une observation, on verse quelques gouttes d'éther sur la mousseline ; sa vaporisation refroidit la boule et y détermine la condensation de l'éther renfermé dans l'appareil. L'évaporation produit un abaissement de température dans la boule noire ; on observe sur le thermomètre qui y est renfermé le degré auquel la rosée provenant de l'air extérieur commence à se déposer sur sa surface extérieure.

L'hygromètre de Regnault vaut encore mieux ; le thermomètre est placé dans un réservoir en argent dans lequel on verse de l'éther ; la vapeur de celui-ci est enlevée au moyen d'un aspirateur. Il se produit un refroidissement et, à un certain degré de température, la rosée se forme sur la surface d'argent.

Mentionnons également deux hygromètres indirects. Dans celui de de Saussure, l'humidité de l'air est mesurée au moyen d'un cheveu qui s'allonge lorsqu'elle augmente et se raccourcit lorsqu'elle diminue. Le mouvement est transmis à une aiguille qui chemine le long d'un arc gradué. Cet instrument est encore fort employé dans les pays froids, et il se trouve exposé parmi les instruments russes et ailleurs.*

Le psychomètre d'Auguste ou de Mason, ou hygromètre à boule sèche et humide, est formé de deux thermomètres dont l'un a la boule enveloppée de mousseline, humectée avec de l'eau. La

* Les hygromètres originaux de de Saussure sont aussi exposés. (Note du traducteur.)

théorie de l'instrument est donnée dans les "Instructions pour l'Emploi des Instruments météorologiques," p. 47.

Quantité de Pluie.

La quantité d'eau tombée est mesurée au moyen d'un pluviomètre qui consiste simplement en un réservoir surmonté d'un entonnoir. Le réservoir a tantôt la forme d'une bouteille (Howard), tantôt il est cylindrique (Glaisher). Il porte lui-même la graduation, ou bien l'on verse l'eau tombée dans une éprouvette graduée.

La neige est en général recueillie dans un pluviomètre; mais cette méthode est exposée à de grandes erreurs, le vent pouvant chasser les flocons hors de l'appareil, ou, dans des chutes abondantes, les flocons s'y accumulent en trop grande abondance. Babinet a eu l'idée d'entretenir sous son pluviomètre une lampe dont la chaleur fond la neige à mesure qu'elle tombe. La mesure de la couche de neige tombée sur une surface plane ne donne pas des résultats plus satisfaisants, à cause de la facilité avec laquelle elle est susceptible de se tasser.

On peut aussi construire des pluviomètres enregistreurs; par exemple, celui de Crossley consiste en un système de godets descendant le long d'une chaîne; il se fait une marque chaque fois que l'un d'entre eux a été rempli et vidé. Dans le pluviomètre de Beckley, adopté par le Comité météorologique de la Société Royale, le godet contient deux dixièmes de pouce d'eau. Il est soigneusement équilibré par un contrepoids, et, à mesure qu'il descend sous l'influence de la pluie qui s'accumule, il entraîne un crayon qui laisse une trace sur du papier. Il enregistre donc d'une manière continue.

Évaporation.

Les instruments pour la mesure de l'évaporation portent le nom "d'atmomètres" ou "d'atmidomètres." L'appareil consiste simplement en un vase largement ouvert, rempli d'eau et qui reste

exposé un certain temps à l'air. La quantité de liquide qui a été enlevée par l'évaporation est appréciée, soit par le volume (Lamont, Dufour, Dr. A. Mitchell), soit par le poids (Osnaghi [exposé] et S. H. Miller). La plupart des atmomètres sont disposés pour être placés dans une cage, à l'abri de la pluie et du vent; ils ne donnent donc jamais qu'une appréciation approximative de l'évaporation en un lieu tout à fait découvert.

Il est d'ailleurs douteux que l'on puisse conclure des résultats obtenus dans de petits appareils à ce qui se passe pour une grande masse d'eau.

VENT.

Le vent est mesuré, soit par la pression qu'il exerce sur une certaine surface, soit par sa vitesse.

Parmi les appareils construits d'après le premier de ces principes, imaginé par Bouguer, le meilleur est celui de Osler; il consiste en une plaque, de surface connue, poussée par le vent contre un ressort; son mouvement s'enregistre sur du papier. Dans un appareil exposé par Cator, des leviers au lieu de ressorts fournissent la résistance.

Un des anémomètres à pression les plus simples, celui de Wild, est formé d'une plaque rectangulaire suspendue par des gonds à un axe horizontal. L'angle qu'elle forme avec la verticale indique la force du vent. Cet appareil n'est naturellement pas enregistreur; il est fort employé en Russie, en Norvège et en Suisse; on en trouvera un modèle dans l'exposition russe. On ignore qui a eu la première idée de cet appareil.

Ch. Wolff en 1743, puis plus tard Whewell, proposèrent d'utiliser les ailes d'un moulin à vent pour mesurer la rapidité du vent. Le seul instrument basé sur cette idée, qui soit employé aujourd'hui, est celui de Robinson. Le vent fait tourner, avec une vitesse égale au tiers de la sienne, quatre coupes hémisphériques fixées à l'extrémité de bras en croix. Beckley y a ajouté un système d'ailes de moulin à vent pour indiquer la direction du

vent, et l'appareil ainsi modifié a été adopté par le Comité météorologique. Les anémomètres enregistreurs portent le nom d'anémographes.

Le professeur von Dettingen de Dorpat a exposé un nouvel appareil enregistreur qu'il appelle "intégrateur automatique des composantes du vent."

Électricité atmosphérique.

Ce phénomène n'est pas observé dans toutes les stations. On peut déterminer la nature de l'électricité au moyen d'un appareil simple tel que les électroscopes à feuilles d'or, de Bennett ou de Bohnenberger. Pour recueillir l'électricité à une certaine distance de la terre, on peut lancer en l'air une flèche métallique attachée par un fil conducteur au plateau d'un électroscope; Volta a proposé d'employer la fumée pour recueillir le fluide; sir W. Thomson, de l'eau s'échappant d'un tuyau de faible diamètre.

Thomson a construit deux électromètres :

1° L'électromètre à quadrants ou à anneau divisé, pour les observatoires.
2° L'électromètre portatif.

Le principe de ces appareils est exposé dans les " Instructions pour l'Emploi des Instruments météorologiques," p. 60. On peut les considérer comme une combinaison de la balance à torsion de Coulomb et de la bouteille de Leyde.

L'électromètre de Peltier a été décrit par sir Charles Wheatstone dans le rapport de l'Association britannique de 1849, p. 11. Cet appareil mesure l'électricité d'après le déplacement, hors du méridien magnétique, d'une aiguille aimantée suspendue à un fil mince.

Ozone.

Il est difficile de trouver une réaction chimique qui soit un indice infaillible de la présence de l'ozone dans l'air; l'action de

la lumière, celles d'agents oxydants autres que l'ozône, entraînant des perturbations dans les résultats accusés par les réactifs.

Schönbein a proposé l'emploi de papier trempé dans de l'amidon iodé.

Pesanteur spécifique de l'Eau.

Les hydromètres destinés à mesurer la densité de l'eau de mer sont formés d'une boule de verre renfermant de la grenaille ou du mercure. Au dessus de la boule est un cylindre de verre terminé par un tube de faible diamètre et gradué. La profondeur à laquelle l'instrument s'enfonce est indiquée par l'échelle, dont le degré au niveau de l'eau donne la valeur de la pesanteur spécifique.

Instruments divers.

Mentionnons ici le photomètre enregistreur du professeur Roscoe, qui est exposé, de même que sa reproduction sur une petite échelle, par le capitaine Abney. Ces appareils sont basés sur le fait, que la profondeur à laquelle pénètre la couleur produite par la lumière dans une couche de chlorure d'argent, est proportionnelle à l'intensité des rayons multipliée par le temps qu'a duré l'exposition.

Divers exposants ont joint à leurs instruments des cartes et des diagrammes montrant le résultat de leurs observations. Les plus importants sont ceux de la Société météorologique d'Écosse pour la température moyenne et la quantité de pluie dans les Îles britanniques; et celles qui contiennent les observations du Dr. A. Mitchell et de M. A. Buchan sur les relations entre le temps et l'état hygiénique.

R. H. Scott.

INSTRUMENTS ET CARTES GÉOGRAPHIQUES.

I.—Instruments employés dans les Travaux géographiques.

L'Aurore des études géographiques apparut au monde moderne, lorsque le prince Henri de Portugal commença à envoyer des expéditions le long des côtes occidentales de l'Afrique, et nécessita pour diriger la navigation l'invention d'instruments géographiques. Les premiers eurent pour objet de diriger la marche d'un navire indépendamment de toute observation astronomique ; leur emploi conduisit les explorateurs du quinzième et du seizième siècles à tracer les contours de nouveaux rivages, avec leurs traits principaux.

L'usage de la boussole, et de grossières cartes nautiques, furent les seules ressources des navigateurs, jusqu'à ce que Martin Behaim, de Nuremberg, leur donnât, en 1480, le moyen de déterminer les latitudes. Ce moyen fut l'astrolabe, employé par Vasco de Gama dans son premier voyage au delà du cap de Bonne-Espérance ; mais le balancement du navire rendait impossible l'exactitude des observations, et la nécessité d'employer trois observateurs simultanés augmentait les chances d'erreur. L'un d'eux tenait l'astrolabe suspendu à son pouce par un anneau, le second prenait la hauteur de l'astre observé, et le troisième en faisait la lecture. Quelques années plus tard, on inventa l'arbalestrille pour la mesure de la hauteur du soleil ou d'une étoile ; et on employa

les deux instruments simultanément dans plusieurs des voyages de date ancienne. Mais les marins anglais préféraient généralement l'arbalestrille, parce que les divisions, plus espacées, se lisaient avec plus de facilité. C'était un instrument très-simple, composé d'une perche verticale et graduée, avec des pièces transversales au nombre de quatre, employées suivant la hauteur, graduées aussi, et disposées de manière à jouer le long de la perche. La direction du soleil était prise au moyen de la boussole, pour fixer l'instant de son passage au méridien; puis, l'observateur appliquant son œil à l'extrémité de la longue règle, mettait la règle transversale en mouvement jusqu'à ce que l'une de ses extrémités fût amenée en contact avec l'horizon et l'autre avec le centre du soleil. On la maintenait dans cette position jusqu'à ce que le soleil la touchât de son bord, et on obtenait alors sa hauteur méridienne. L'invention du quadrant à réflexion ou backstaff, due au grand explorateur des mers arctiques, John Davis, était déjà un perfectionnement de l'arbalestrille. L'observateur, tournant le dos à l'astre, en percevait l'image réfléchie dans un miroir, ce qui a été un premier pas fait vers l'invention du quart de cercle et du sextant.

L'astrolabe était un cercle de métal gradué tout autour du limbe, avec une règle appelée *alhidada*, fixée au centre par un axe et se mouvant sur le pourtour du cercle gradué. Elle était pourvue de deux mires, une à chaque extrémité. L'instrument était suspendu verticalement par un anneau tenu par une des mains de l'observateur, tandis que l'autre manœuvrait l'alidade jusqu'à ce que le soleil fût visible dans l'alignement des deux mires. On obtenait ainsi sa distance zénithale, particulièrement lorsque l'observation se faisait sous les latitudes où la distance zénithale était faible, tandis qu'on réservait l'usage de l'arbalestrille pour les basses latitudes, parce qu'on y trouve de la facilité à voir en même temps les deux extrémités de la règle transversale. Avec l'invention de ces instruments, parurent aussi des instructions sur la manière de les employer et de calculer les observations. Le premier de ces

traités qui parut en Angleterre fut "Le vieux Routier de la mer," imprimé en 1490. Il fut suivi des "Secrets du Marin," par John Davis, et d'un "Guide de la Mer," contenant des renseignements très-nécessaires, avec une "parfaite Carte des Mers," publié par Thomas Hood en 1596. Ces anciens manuels contenaient des définitions, des instructions pour l'emploi de la carte et de la boussole, de l'arbalestrille et de l'astrolabe, des tables de déclinaisons et la manière de s'en servir, des procédés pour naviguer par l'estime et pour connaître la longitude. La latitude s'observait directement, mais la longitude n'était indiquée qu'à partir du méridien des îles Canaries, alors adopté par toutes les nations civilisées. On employait aussi, pour déterminer les différences de longitude, l'intervalle de temps écoulé entre l'heure où une éclipse de lune était observée, et l'heure calculée dans les éphémérides de cette époque. Les marins étaient aussi pourvus de tables dans lesquelles on indiquait en milles la valeur des degrés de longitude sous toutes les latitudes.

C'est par l'emploi de ces instruments primitifs et de ces méthodes que les navigateurs du règne d'Elisabeth et leurs contemporains d'Espagne, de Portugal, de France, et de Hollande parvenaient à tracer les contours des vastes régions qu'ils découvraient, et contribuaient à accroître la somme des connaissances humaines, tandis que la somme de richesse et de prospérité de ces nations progressait avec le développement des idées.

Les améliorations apportées aux instruments scientifiques marchèrent de pair avec le progrès des découvertes. La grande difficulté était dans la détermination des longitudes, et ce fut l'établissement d'une commission avec ce but spécial, en 1713, qui donna le plus fort stimulant aux inventions relatives à la géographie, pour l'Angleterre du moins. C'est au Bureau des Longitudes qu'est due l'idée de la publication du Nautical Almanac et la création d'un corps d'ingénieurs hydrographes. Le Nautical Almanac parut pour la première fois en 1767, sous les auspices du Dr. Maskelyne, astronome royal, qui fournit un nouveau moyen

d'obtenir la longitude, emprunté à ses tables des distances lunaires. L'invention du quart de cercle due à Hadley, en 1731, supplanta complètement l'emploi de l'astrolabe et de l'arbalestrille, pour prendre en mer la hauteur des corps célestes ; elle fut bientôt suivie de celle des sextants de Dollond et de Troughton construits sur le même principe.

Les travaux des voyageurs continentaux augmentèrent en exactitude en même temps que les instruments et les cartes marines. Les premiers explorateurs avaient dû se contenter de construire, au lieu de cartes, des itinéraires sans autre indication que celle des distances, comme les tables de Pentinger. L'emploi de la boussole pour indiquer les directions de ces itinéraires fut une amélioration importante ; et après l'invention du quart de cercle par Hadley, on commença à introduire dans le tracé de ces grossiers itinéraires le contrôle des observations astronomiques. Bruce emporta en Abyssinie un quart de cercle dont il fit un excellent usage, mais dont le poids exigeait l'aide de trois hommes ; le Major Rennell, pour sa carte du Bengale, construite de 1763 à 1782, mesurait les distances à la chaîne, et les contrôlait par l'observation de la latitude et de la longitude à des stations fixes.

De nos jours le voyageur emporte une bonne montre, un sextant, un horizon artificiel, une boussole à azimuts, un exemplaire du Nautical Almanac et des tables. Il doit aussi se pourvoir de baromètres anéroïdes et d'appareils pour déterminer la température de l'eau bouillante, qui le mettent à même de tracer les traits du relief du pays par la construction d'une section verticale. Les cartes construites avec l'aide de ces appareils, et des matériaux qu'ils fournissent, se trouvent suffisantes pour tous les besoins du commerce et de la politique dans les pays sauvages et peu connus. La plus grande partie de la terre rentre dans cette catégorie. Elles sont basées sur des observations astronomiques en aussi grand nombre que possible, et les intervalles sont tracés au moyen de sections transversales, d'itinéraires et de levers de détail. Mais les cartes marines et côtières dont dépend le salut

R 2

des navires ne sauraient être construites avec trop d'exactitude. Pour des côtes fréquentées un lever approximatif doit être remplacé par l'emploi des méthodes trigonométriques.

Les procédés scientifiques varient avec les besoins et le but que l'on se propose d'atteindre; et lorsque les cartes sont destinées, non-seulement aux besoins militaires, politiques et commerciaux, mais à ceux de l'administration et du cadastre, elles réclament l'emploi de méthodes par lesquelles la géodésie arrive à des résultats que nous pouvons appeler son triomphe, et qui pourraient sembler incroyables aux personnes étrangères à ces travaux.

Les levers géodésiques sur lesquels s'appuient l'administration et la statistique, rendent encore à la science pure des services précieux, en lui fournissant par la mesure d'arcs du méridien des données sur la forme de la terre. Des levers trigonométriques ont été commencés dans toutes les contrées de l'Europe, à l'exception de la Turquie, et ils sont achevés déjà dans plusieurs. Le lever des côtes des États-Unis (United States Coast Survey) a aussi été transformé en une carte assujettie aux principes rigoureux de la trigonométrie.

Dans la Grande-Bretagne la construction de la carte du dépôt de la guerre (Ordnance Survey) a été commencée au mois d'avril de l'année 1784, par la mesure de la base de la bruyère d'Hounslow (Hounslow Heath), dans le comté de Middlesex, par le général Roy. La triangulation des Îles Britanniques, commencée en 1784 et achevée en 1852, a été basée sur la détermination exacte de 250 positions principales. Les deux bases de la plaine de Salisbury dans le sud de l'Angleterre et des bords du Lough Foyle dans le nord de l'Irlande, ont été mesurées avec des règles à compensation de 10 pieds de longueur, inventées par le général Colby. La base du Lough Foyle fut mesurée en 1827, et celle de la plaine de Salisbury en 1849. On peut se faire une idée de l'extrême exactitude de ces mensurations par le fait que, lorsqu'on répéta la mesure d'une portion de la base du Lough Foyle, après un intervalle de plusieurs années, la différence entre

l'ancienne et la nouvelle mensuration ne dépassa pas un tiers du trait le plus fin qui pût être tracé avec la pointe d'une aiguille. L'exactitude de ces deux bases fut soumise à une épreuve encore plus sévère. Elles sont séparées l'une de l'autre par un intervalle de 360 milles, et, partant de celle du Lough Foyle comme base de la triangulation, on calcula quelle devait être la longueur de la seconde, déduite du réseau des triangles intermédiaires. La différence entre cette donnée du calcul et la mesure réelle qui en avait été faite en 1849 se trouva d'environ 5 pouces. Les instruments employés dans la triangulation étaient deux théodolites de 3 pieds, construits par Ramsden, un théodolite de 18 pouces de Ramsden, et un théodolite de 2 pieds de Troughton et Simms. Les côtés des triangles ont une longueur moyenne de 35 milles, qui s'est quelquefois étendue à 100 et une fois à 111 milles. Les deux stations extrêmes du côté d'un triangle étaient liées par l'emploi d'un *héliostat,* ou miroir tournant, pour réfléchir les rayons du soleil du point d'observation vers la station éloignée. Mais, sous le climat des îles Britanniques, des semaines entières ont quelquefois dû s'écouler dans la vaine attente de ce rayon de lumière. On est parvenu au même degré d'exactitude dans la mesure des angles verticaux, la hauteur de l'une des montagnes d'Écosse mesurée trigonométriquement s'étant trouvée concorder, à 1½ pouce près, avec le résultat d'un nivellement exécuté avec le niveau à bulle d'air.

La mesure exacte d'un arc du méridien de 10 degrés, compris entre les Îles Shetland et l'Île de Wight, a fait partie des opérations de l'Ordnance Survey. En combinant ses résultats avec ceux de mesures semblables exécutées près de Quito sous l'équateur, dans l'Indoustan, en France, au Hanovre, en Danemark, en Prusse, en Russie et en Suède, le colonel Clarke a trouvé que la figure de la terre est un sphéroïde dont le demi-diamètre équatorial a une longueur de 20,926,350 pieds, le demi-diamètre polaire 20,853,429 pieds et l'ellipticité $\frac{1}{28907}$. En 1860 tous les levers du continent européen approchaient de leur achèvement, et il fut résolu en

commun de les relier entre eux par la mesure transversale d'un arc du 52me parallèle, sous la latitude comprise entre Valentia sur la côte sud-ouest de l'Irlande, et Orsk sur la rivière Oural, dans le gouvernement d'Orenbourg, distance de plus d'un cinquième de la circonférence du globe sous cette latitude. La triangulation anglaise fut reliée avec un plein succès à celles de France et de Belgique au mois de janvier 1862.

Comme mesure préliminaire à cette grande opération sur l'arc du 52me parallèle, tous les étalons des mesures employés en Europe, aux Indes, et aux États-Unis furent envoyés à Southampton en 1865, pour y être comparés à ceux d'Angleterre par le colonel Clarke.

Dans les levers de détail, on emploie des théodolites de sept pouces pour la construction de triangles secondaires, liés aux stations des triangles de premier ordre, et auxquels on donne des côtés d'un mille environ ; ils sont ensuite remplis par les procédés ordinaires de l'arpentage. On ajoute au lever horizontal un système très-complet de nivellement, dont les cotes sont inscrites en général à des distances d'un quart de mille sur la direction de presque toutes les routes du royaume.

Il est remarquable que le commencement de la carte de l'Inde n'a été entrepris que dix-huit ans après celui de la Grande-Bretagne. Le début fut conduit en 1802, par le major Lambton, qui mesura une base dans le voisinage de Madras, au moyen d'une chaînette d'acier et avec un théodolite de 3 pieds construit par Cary. Lambton, après vingt années d'activité, laissa la tâche au colonel Everest, qui crut devoir recommencer les opérations de son prédécesseur, en 1830, avec des instruments plus parfaits et avec les règles à compensation de Colby. En 1841 il acheva la série des triangles sur lesquels s'appuie la mesure du grand arc de méridien compris entre le cap Comorin et les monts Himalaya. La triangulation générale de l'Inde, continuée par le général sir Andrew Waugh et le colonel Walker, approche de son achèvement, avec une exactitude égale à celle qui a été atteinte en Angleterre. En

1867, une nouvelle base fut mesurée à Bangalore dans le Maïssour, et sa longueur donnée par l'opération même se trouva d'accord à un quart de pouce près avec celle que donnait le calcul, en partant d'une autre base mesurée à Vizagapatam sur la côte des Circars. Une nouvelle collection d'instruments construits sous la direction du colonel Strange a été récemment envoyée aux Indes. Elle se compose d'un magnifique théodolite avec cercle horizontal de 3 pieds de diamètre, de deux secteurs zénithaux, de deux instruments des passages de 5 pieds, de deux autres plus petits, de deux cercles verticaux de douze pouces, de deux chronographes galvaniques pour enregistrer les observations de passages au méridien, et de trois pendules astronomiques.

Aux Indes, de même qu'en Angleterre, les stations des triangles primordiaux forment les points de départ de la triangulation secondaire, qui sert à son tour à fixer les limites, et les détails topographiques sont ensuite intercalés par les arpenteurs topographes et cadastraux sous la direction de l'ingénieur en chef; aux premiers échoit l'exploration des districts sauvages et peu peuplés, dans les états indigènes, tandis que les arpenteurs du cadastre opèrent dans les districts populeux, où les intérêts de l'administration exigent une exactitude minutieuse.

Dans la Grande-Bretagne et dans l'Indoustan, aux États-Unis comme chez toutes les nations de l'Europe et dans quelques colonies anglaises, on a entrepris des cartes cadastrales, assujetties aux procédés de la trigonométrie, pour les besoins de la statistique et de l'administration.

Ainsi les moyens d'exécution pour les diverses sortes d'opérations géographiques et géodésiques varient selon le degré requis d'exactitude. Pour la navigation ordinaire, et pour l'esquisse rapide de côtes récemment découvertes, il suffit de la boussole, du sextant, du chronomètre et de la sonde. Mais pour l'établissement de cartes dans des mers et des passages très-fréquentés, il faut recourir à la rigueur des opérations trigonométriques. De la même manière, l'explorateur d'une région nouvelle peut se

contenter d'une ligne de route soigneusement détaillée, et contrôlée de distance en distance par des points, dont il détermine la position par des observations astronomiques exécutées au moyen du sextant et de l'horizon artificiel. Il faut cependant un peu plus d'exactitude pour fixer, au travers de contrées à moitié barbares, les limites politiques, les routes les plus fréquentées et les détails des reconnaissances militaires. Le major Saint-John mesurait soigneusement au moyen de l'odomètre (perambulator) les distances parcourues par lui en Perse, déterminant la longitude au moyen du télégraphe électrique, indépendamment des observations ordinaires, faites avec le sextant. Mais dans la construction de cartes très-exactes, on ne considère comme admissibles que des erreurs dont l'étendue ne doit pas dépasser un pouce pour cent milles.

CLEMENTS R. MARKHAM.

II.—Cartes géographiques.

La Géographie est la science par laquelle on trace et on décrit l'aspect de la surface de la terre, on y fixe les frontières, on en mesure l'étendue et on y détermine la position exacte des localités. La géographie politique nous fait connaître les divisions actuelles de la terre et leur gouvernement. La géographie historique ou comparée expose les changements par lesquels elle a été modifiée dans les temps antérieurs. La géographie physique dirige les études vers les accidents de la surface de la terre et les causes dont ils résultent. L'histoire du progrès des découvertes par lesquelles on est arrivé à en tracer plus exactement l'aspect, celle des explorateurs, de l'usage qu'on a fait de leurs travaux, complètent l'ensemble des connaissances embrassées par cette science. L'histoire de la géographie est un sujet qui se divise naturellement en trois parties : d'abord les instruments et appareils scientifiques employés à la mensuration et au tracé de la surface de la terre ; secondement les opérations de l'explorateur et du géomètre en campagne ; troisièmement l'utilité pratique de leurs travaux et de leurs recherches.

Il est impossible d'isoler entièrement les trois branches d'une étude qui sont à toutes les périodes étroitement unies ensemble. L'explorateur et le géographe théoricien, d'âge en âge, à mesure que leur science progresse, réclament, l'un de nouveaux instruments et de nouveaux procédés d'observation, l'autre de nouveaux faits scientifiques nécessaires à l'établissement de ses théories.

La construction des cartes marines et terrestres a reçu des perfectionnements proportionnés à ceux des instruments qu'elle emploie. La carte faisant partie indispensable de l'appareil scientifique de l'explorateur, celui-ci a toujours visé à l'étendre et à la corriger, et le tracé des côtes a reçu des corrections proportionnées aux perfectionnements de ses instruments. Tandis que, d'une part, l'examen d'une série de sextants et de boussoles

d'époques différentes met au jour le talent d'invention qui a graduellement répondu à des exigences nouvelles, ainsi que les progrès faits dans la manière de s'en servir ; d'autre part, l'examen d'une série de cartes de dates différentes démontre les effets obtenus de l'emploi d'instruments plus parfaits et de méthodes plus exactes, par lesquelles les cartographes sont graduellement arrivés à une représentation plus fidèle de la surface de la terre.

Le caractère des cartes change avec les besoins qui les réclament, depuis le grossier croquis du pionnier jusqu'à la carte cadastrale, appelée à fixer des questions de propriété et de juridiction. Les cartes de l'état-major du Royaume-Uni et des finances indiennes appartiennent à cette dernière classe.

Pour le Royaume-Uni il y a une carte topographique construite à l'échelle d'un pouce pour un mille ($\frac{1}{63360}$), et il y aura des cartes particulières pour chaque comté, à l'échelle de six pouces ($\frac{1}{10560}$), et des plans paroissiaux à l'échelle de vingt-cinq pouces ($\frac{1}{2500}$), destinés seulement aux districts cultivés d'Angleterre et d'Écosse dont la carte n'a pas encore été achevée à l'échelle de six pouces. En 1871 fut achevé le plan de Londres à l'échelle de cinq pieds au mille, occupant 326 feuilles. Les feuilles à l'échelle d'un pouce, et celles à l'échelle de six pouces, se vendent à des prix qui les mettent à la portée de toutes les personnes auxquelles le besoin peut s'en faire sentir ; et personne dans toute l'étendue des îles Britanniques n'est privé de l'avantage de posséder une carte exacte et belle de son voisinage, ou un plan de sa propriété ou de sa ferme. Des cartes également bonnes s'exécutent ou sont achevées dans tous les pays de l'Europe, et sont extrêmement précieuses pour l'homme d'état, l'administrateur et le statisticien ; elles sont des guides indispensables à l'historien, à l'ingénieur, au légiste et au fermier. Il n'existe pas d'enquête ou d'entreprise qui puisse s'en passer.

Dans l'Inde anglaise la publication des cartes résultant du lever officiel a fait depuis quelques années des progrès rapides sous l'habile direction du colonel Thuillier. L'atlas indien com-

mencé en 1827, à l'échelle d'un pouce pour quatre milles, approche de son achèvement et couvrira 177 feuilles ; tandis que les mêmes travaux topographiques sont utilisés d'autre part pour donner au cadastre, aux villes, aux stations, des cartes sur une plus grande échelle. Dans les autres colonies ces travaux sont loin d'avoir fait d'aussi grands progrès, et les travaux topographiques n'y sont qu'à leur début, tandis que les opérations géodésiques sont en pleine activité aux États-Unis. De même qu'en Angleterre, en France, on publie une édition à bon marché de la grande carte de l'état-major ; en Belgique l'extrême division des propriétés rurales a fait sentir la convenance d'une échelle double de celle de la carte française ; en Suisse, la carte en vingt-cinq feuilles, exécutée sous les auspices du général Dufour, a été achevée en 1866 ; et de tous les autres pays de l'Europe, la Turquie est le seul où rien n'ait été fait.

A la longue ces sortes de cartes serviront à peindre l'aspect physique du globe entier ; mais elles n'ont encore atteint ce degré de perfection, que chez les nations qui figurent à la tête de la civilisation. Les autres doivent se contenter de cartes telles que les donnait la topographie il y a cinquante ans. Dans cette seconde catégorie nous mettrons au premier rang pour son antiquité, et probablement aussi pour son exactitude, la carte de la Chine, qui fut commencée par les missionnaires Jésuites sous les auspices de l'empereur Kang-hi en 1708, et achevée en 1718. Une triangulation élémentaire, contrôlée au moyen d'altitudes du soleil et de l'étoile polaire, fut complétée au moyen des détails topographiques que les Jésuites trouvèrent dans les archives des cités chinoises. C'est encore sur cette carte que se règle notre connaissance du plus grand nombre des provinces de l'empire. En Perse et en Turquie nous ne possédons que les itinéraires des voyageurs, et quelques bons travaux topographiques exécutés par des Européens en Syrie et en Mésopotamie.

Dans l'Amérique méridionale et le Mexique nos connaissances ne reposent pas sur des bases différentes et meilleures ; cependant

le premier arc de méridien fut mesuré dans l'Amérique méridionale, et l'on pourrait encore utiliser pour de nouvelles opérations les signaux qui furent alors placés dans les environs de Quito, et qui ont été restaurés par le président de la république de l'Équateur, don Vicente Rocafuerte. Pour le Venezuela nous avons la carte de Codazzi, pour la Colombie celle d'Acosta, pour l'Équateur un travail très-incorrect de Villavicencio. On a fait au Brésil quelques travaux meilleurs, et de bonnes reconnaissances du San Francisco et d'autres rivières. Un atlas péruvien a été édité par Paz Soldan; il sera probablement remplacé par le magnifique ouvrage topographique publié par don Antonio Raimondi, aux frais de l'état. Les officiers chiliens ont fourni une bonne quantité de travaux topographiques, dont le professeur Pissis a été le directeur et l'éditeur. C'est ainsi que des pays au second rang de la civilisation se trouvent pourvus de cartes jusqu'à ce que le besoin de travaux trigonométriques de premier ordre s'y fasse sentir.

La troisième classe de cartes comprend l'œuvre d'explorateurs de régions peu ou point connues, et de géographes qui utilisent, au moyen d'une compilation intelligente, les travaux des voyageurs. À cette catégorie se rattachent les cartes d'une grande partie de l'Asie centrale, de l'Afghanistan et de l'Arabie; de l'intérieur de l'Afrique tropicale, de la région forestière de la Bolivie, du Pérou, de Quito et de la Colombie; de même que celles des régions arctiques et antarctiques, régions malheureusement très-vastes, et dont la Société Royale de Géographie aspire à diminuer l'étendue. La masse considérable d'ouvrage achevé dans ce but pendant quarante-six ans ne dispense pas la Société de persévérer encore dans la noble tâche de réduire l'étendue de ces terres inconnues.

L'instruction à tirer de l'étude d'une grande collection de cartes, surtout de l'inspection d'une série de cartes de la même région à des intervalles différents, est intéressante et variée. Cette étude est indispensable à l'historien s'il veut être maître de son sujet.

L'historien qui n'est pas doué de l'instinct géographique est dépourvu de l'une des qualifications les plus nécessaires à sa tâche; aucun secours n'est plus utile à l'étude de l'histoire que l'inspection des cartes d'un pays à des périodes différentes; telles que celles, par exemple, dont M. Freeman a accompagné son Histoire de la Conquête normande.

L'étude d'une série de cartes de la même région peut souvent jeter quelque lumière sur les changements physiques qui s'y sont effectués, et sur ceux qui pourraient encore apporter des modifications au cours des rivières et à l'état des ports. C'est ainsi que nous apprenons les changements merveilleux dont le bassin de l'Indus a été le théâtre. Moultan, comme nous l'apprend cette comparaison, était autrefois située sur une île de la rivière Ravî, dont elle est actuellement éloignée de trente milles. La Sarasvati, bien arrosée à l'époque classique, est aujourd'hui un désert aride. Une comparaison entre l'état actuel du Bengale, la carte du major Rennell et les cartes hollandaises encore plus anciennes, démontre l'importance des changements accomplis dans le delta du Gange et du Brahmapoutra. Les mêmes causes sont encore à l'œuvre et leur étude fournira peut-être le moyen de détourner leur influence menaçante pour les villes de ce pays.

CLEMENTS R. MARKHAM.

III.—Collection de Cartes arctiques.

Liste des Cartes exposées.

1. Fac-simile de l'ancienne carte des Zeni. (R.G.S.)[1]
2. Carte de Hondius, d'après Pontanus. (H.S.)[2]
3. Carte de Petermann, montrant l'itinéraire de Barents. (R.G.S.)
4. Carte du voyage de Barents publiée par Gerrit de Veer. (R.G.S.)
5. Carte du Spitzberg de Purchas. (G.M.)[3]
6. Carte d'Hudson en 1612. (H.S.)
7. Van Keulen carte du Spitzberg. (G.M.)
8. Carte hollandaise du détroit de Davis après 1721. (A.)[4]
9. Carte manuscrite du nord du Spitzberg de Phipps. (A.)
10. Carte circompolaire en 1818. (R.G.S.)
11. Carte de la baie de Baffin par John Ross, 1818. (A.)
12. Voyage de Buchan au Spitzberg. MS. par Beechey. (A.)
13. Carte des découvertes de Parry. Premier voyage. MS. de Liddon. (A.)
14. Découvertes de Parry. Premier voyage. MS. de Bushnan. (A.)
15. Découvertes de Parry. Second voyage. MS. de Bushnan. (A.)
16. Route de Parry dans le nord du Spitzberg en 1827. MS. de Foster. (A.)
17. Carte de Julianshaab au Groenland, par Graah. (R.G.S.) Carte danoise du Groenland avec les noms esquimaux. (R.G.S.) Carte de la rivière de Baal et du district de Godthaab, par Moller. (R.G.S.)
18. Carte circompolaire de 1855. (A.)
19. Carte circompolaire de 1838. (A.)
20. Carte du voyage de Simpson, depuis la pointe Barrow au Return Reef. (R.G.S.)
21. Fac-simile de la carte donnée à sir John Franklin. (R.G.S.)
22. Carte circompolaire de 1850. (A.)
23. Iles de Parry et Amérique arctique, 1850. (A)
24. Route de l'*Assistance* jusqu'aux îles Cary, 1851. (A.)
25. Carte circompolaire physique de Sutherland, 1851. (R.G.S.)
26. Carte des voyages du Dr. Rae sur la côte arctique de l'Amérique, par Arrowsmith. (S.)[5]
27. Ile Herald, MS. et vues. (R.G.S.)
28. Carte de la baie de Baffin, avec les corrections du capitaine Inglefield. (A.)

(1) R.G.S., empruntée à la Collection de la Société royale de Géographie.
(2) H.S., des volumes publiés par la Société de Hakluyt.
(3) G.M., du Geographical Magazine.
(4) A., Amirauté.
(5) S., de Stanford.

29. Découvertes de M'Clure, 4 feuilles MS. (A.)
30. Carte des découvertes de M'Clintock en 1859, par Arrowsmith. (R.G.S.)
31. Découvertes de M'Clintock. MS. d'Allen Young. (A.)
32. Carte circompolaire de 1859. (R.G.S.)
33. Carte des découvertes de Kane dans le canal de Smith, de l'Amirauté. (R.G.S.)
34. Manuscrit original des découvertes de Kane. (R.G.S.)
35. Carte de la Terre de Wrangell, par Petermann, 1869. (R.G.S.)
36. Carte du capitaine Long et croquis de la Terre de Wrangell, 1867. (R.G.S.)
37. Carte suédoise du Spitzberg.
38. Carte du voyage de Nordenskiöld au Spitzberg en 1868, Petermann. (R.G.S.)
39. Carte de l'extrémité septentrionale de la Novaïa Zemlia, par Petermann, 1872. (R.G.S.) Avec les îles Waigat, le Matotchin Shar.
40. Route du capitaine Koldewey en 1868, Petermann. (R.G.S.)
41. Découvertes de l'expédition allemande sur la côte orientale du Groenland. (R.G.S.)
42. Terre de François-Joseph, découvertes de l'expédition autrichienne. (R.G.S.)
43. Carte de l'hypothèse de Petermann, faisant du canal de Smith un cul-de-sac. (R.G.S.)
44. Découvertes de Hall sur la *Polaris*, carte Américaine. (R.G.S.)
45. Carte de Petermann montrant le trajet du canot de la *Polaris* vers le sud de la baie de Baffin. (R.G.S.)
46. Route de l'*Arctic* en 1873, par le commodore A. H. Markham. (G.M.)
47. Carte circompolaire par Stanford, 1875. (S.)
48. Route de l'*Alert* au travers de l'océan Atlantique. (A.)
49. Ile de Disco. (G.M.)
50. Route de l'*Alert* d'Upernivik aux îles Cary. (G.M.)
51. Nouvelle carte de la baie de Baffin. (A.)
52. Nouvelle carte du canal de Smith. (A.)
53. Nouvelle carte de la moitié du pôle arctique. (A.)
54. Carte montrant les hivernages de toutes les expéditions. (A.)
55. Projection à l'usage de l'expédition actuelle au pôle. (A.)

---

1. L'ÉTUDE d'une série choisie de cartes destinées à montrer le progrès des découvertes dans les régions arctiques est le meilleur moyen de se former une notion exacte de l'ouvrage qui a été effectué par la longue série des expéditions, dont la dernière hiverne actuellement sur la limite de la vaste étendue des régions inconnues.

2. La plus ancienne de toutes les cartes arctiques est la fameuse carte dessinée par les Zeni pour accompagner leurs voyages au quatorzième siècle, dont l'histoire a été admirablement éclaircie par M. Major. On y trouve les Orkneys, les Shetland, les Færœr et l'Islande correctement placées dans leurs positions respectives ; Engroenland dessiné de manière à faire le désespoir des géographes futurs ; et la Frislande avec d'autres terres inconnues plus à l'ouest.

3. Les Hollandais furent les pères de la géographie moderne ; mais ils ont emprunté aux Zeni une bonne partie des matériaux de leurs plus anciennes cartes du nord. Toutefois les cartes des régions polaires de Hondius, publiées dans Purchas et dans Pontanus, forment un point de départ à partir duquel nous indiquerons le développement graduel des connaissances nautiques. Les voyages arctiques ont, autant que les autres, conduit à la prospérité les peuples qui s'y sont livrés.

4. Hondius, tout en copiant partiellement les Zeni, nous donne l'état des connaissances géographiques relatives à ces régions à la fin du règne d'Élisabeth. Il indique les côtes de la Laponie jusqu'à Archangel, la côte occidentale de la Novaïa Zemlia, les côtes ouest et nord du Spitzberg découvertes par le brave Barents dans son "Admiranda Navigatio" de 1596, et une vague notion du Groenland.

5. Alors les explorateurs anglais commencent à montrer leur activité par l'étendue des côtes relevées dans la mer arctique. Purchas publia, en 1612, une carte du Spitzberg où il ajoute aux côtes septentrionales et occidentales de cet archipel l'indication d'une île de Wiche à l'est, qui disparut plus tard de la cartographie pour rentrer récemment dans la liste des terres d'une existence réelle. On voit sur cette carte les baleines rejetant l'eau par leurs évents entre les méridiens, et donnant ainsi une idée de la nature des richesses que les aventuriers d'Angleterre et de Hollande allaient chercher dans ces parages. A la même époque Frobisher, Hudson et Davis étendaient nos notions du côté de l'ouest. La

carte des Zeni, employée encore par Frobisher et par Davis, les induisit dans quelques erreurs. Lorsque le premier toucha la côte du Groenland, il se crut à la Frislande des Zeni, et Davis la prenant pour un pays absolument nouveau, lui donna le nom de "Désolation." Puis l'entrée découverte par Frobisher au nord de la baie d'Hudson fut prise pour un détroit reliant l'océan Atlantique avec le détroit de Davis. L'Engroenland des Zeni fut placé au nord du détroit de Frobisher et la "Désolation" de Davis au sud. Toutefois malgré toutes ces erreurs les deux rives du détroit de Davis étaient exactement dessinées.

6. Le voyage mémorable de Baffin, en 1616, aurait encore étendu les découvertes arctiques, si sa carte n'avait pas été perdue par l'étourderie du vieux Purchas. Ses magnifiques découvertes furent alors condamnées à l'obscurité et presque à l'oubli, jusqu'à ce que le voyage de sir John Ross dans les mêmes parages, en 1818, leur rendît tout leur lustre.

7. Au commencement du siècle dernier, les marins et les cartographes hollandais avaient apporté quelques corrections aux notions antérieures. En 1707, Van Keulen publia une carte corrigée du Spitzberg, où la côte orientale se trouve pour la première fois tracée en entier, avec les Sept Iles du nord et la mystérieuse Terre de Gilles; mais la Terre de Wiche, découverte par les Anglais en 1617 et consignée dans la carte de Purchas, a disparu. Parry, en 1827, rendit hommage à l'exactitude de la carte de Van Keulen. Cet habile cartographe publia en outre une carte du détroit de Davis dont le besoin devait se faire sentir, car, entre 1715 et 1725 il n'y eut pas moins de 748 voyages faits dans cette direction par des baleiniers hollandais. Leur principale station de pêche était à la baie de Disco, et la côte du Groenland était bien connue d'eux jusqu'à Saunderson's Hope, le point le plus éloigné atteint par Davis plus d'un siècle auparavant. On rapporte que le commandant L. Feikes Haan suivit, en 1715, la côte occidentale du Groenland jusqu'à 72° de latitude septentrionale, où il fut arrêté par des glaces compactes. De la sorte

aucun navigateur ne réussit au 18e siècle à suivre les traces de l'audacieux Baffin ; mais vers la fin de ce siècle, le capitaine Cook découvrait les côtes nord-ouest de l'Amérique et les suivait, au delà du détroit de Behring, jusqu'au cap Glacé ; Hearne atteignait, en 1772, les côtes de la mer Glaciale en descendant le cours de la rivière de la Mine de Cuivre (Coppermine River) ; et Mackenzie arrivait au même but, en 1789, par l'embouchure du fleuve qui porte son nom.

8. L'année 1818 peut être considérée comme la première de la période moderne des découvertes arctiques, et une carte préparée à cette époque en indique le point de départ. Il faut convenir que les Russes y prennent le premier rang en ajoutant toute l'étendue des côtes sibériennes à la connaissance de la Novaïa Zemlia due aux Hollandais. Le capitaine Phipps avait fait quelques additions à la carte du Spitzberg de Van Keulen. Les Hollandais avaient également donné un tracé exact du détroit de Davis et de la côte occidentale du Groenland jusqu'à Saunderson's Hope ; on en devait autant aux Anglais pour la baie et le détroit d'Hudson ; mais les grandes découvertes de Baffin étaient si bien oubliées que les côtes par lui explorées étaient indiquées vaguement vers le nord-est par une ligne ponctuée ; une carte de 1818 portait même cette légende : "Baie de Baffin, d'après la relation de Baffin en 1616, aujourd'hui considérée comme apocryphe." * Sauf aux embouchures du Mackenzie et de la Mine de Cuivre, toute la région maritime comprise entre le cap Glacé de Cook et la baie d'Hudson était absolument inconnue.

9. En 1818, le capitaine John Ross partit pour le premier voyage arctique entrepris dans ce siècle, ayant sous ses ordres le lieutenant Parry. Il suivit presque exactement la route de Baffin et réhabilita la mémoire de ce grand navigateur, en replaçant sur sa carte tous les noms de caps, de détroits et d'îles mentionnés par lui sur le pourtour entier de la baie de Baffin.

* Dans l'ouvrage de Barrington intitulé : "Possibility of approaching the North Pole."

Il commit toutefois une erreur en supposant que les bras de mer appelés *sounds* par Baffin étaient de simples baies, erreur qu'il faut lui pardonner, car il a ouvert la voie à une pêche lucrative de la baleine, et inventé un appareil au moyen duquel on peut retirer des échantillons d'histoire naturelle de profondeurs dépassant un millier de brasses (fathoms). Ce fut dans la baie de Baffin, par la pêche d'un beau spécimen d'*asterophyton*, que fut inauguré le dragage de la mer à de grandes profondeurs. Ce voyage fit aussi connaître un nouvel oiseau arctique, la mouette de Sabine. Dans la même année le capitaine Buchan et le lieutenant Franklin, avec Beechey et Back sous leurs ordres, conduisaient une autre expédition jusqu'à la limite des glaces fixes (pack) au nord du Spitzberg.

10. En 1819, le lieutenant Parry entreprenait ce qui a été en somme le plus brillant des voyages arctiques. Entrant dans le détroit de Lancaster, vu par Baffin, il en suivait le prolongement occidental qu'il nomma le détroit de Barrow, il découvrait l'entrée du Prince Régent, les côtes orientales et septentrionales du Somerset du Nord, l'entrée du canal de Wellington et les rives méridionales du North Devon, des îles Cornwallis, Bathurst, Byam Martin et Melville, dépassant le 110me méridien, qui assurait aux explorateurs une gratification de 5,000 livres sterling. Arrêté à l'extrémité occidentale de l'île Melville par une barrière impénétrable de glace, Parry aperçut encore dans le sud une terre qu'il nomma, sans l'atteindre, Terre de Banks. Dans son second voyage, qui entraîna deux hivernages (1821-23), Parry pénétra dans la baie d'Hudson et découvrit le détroit de l'Hécla et de la Furie, qui la met en communication avec l'entrée du Prince Régent. Dans le troisième voyage, fait en 1824 et 1825, il suivit les traces du premier, mais avec un temps si peu favorable qu'il fut contraint d'hiverner au Port Bowen, sur la côte orientale de l'entrée du Prince Régent. Dans l'été qui suivit, l'un de ses vaisseaux, la *Fury*, fut jeté à la côte et perdu, et le retour s'effectua sans que son voyage eût amené aucun résultat.

11. Franklin, Richardson et Back, dans leurs étonnants voyages par terre, fixaient les côtes septentrionales de l'Amérique, tandis que Parry y travaillait par mer. De 1819 à 1822 ils s'avancèrent à l'est de la Mine de Cuivre jusqu'au cap Turnagain, et leurs découvertes des années 1825-26 furent poussées à l'ouest du fleuve Mackenzie au Return Reef. Les efforts de plusieurs expéditions furent combinés de manière à compléter, en 1825, la connaissance du passage Nord-ouest. Partant de la baie de Baffin, Parry devait s'avancer à l'ouest ; le capitaine Beechey avec le *Blossom* fut envoyé à sa rencontre par le détroit de Behring, tandis que Franklin devait former un lien entre les deux expéditions parties des points extrêmes. Ainsi que nous l'avons vu, le voyage de Parry fut infructueux. Franklin, parti du Mackenzie à la rencontre de Beechey, ne put dépasser le Return Reef, tandis que Beechey dut se contenter d'ajouter aux découvertes anciennes de Cook le court intervalle qui sépare le cap Glacé de la pointe Barrow. Après ces expéditions terminées en 1825-26, les recherches par la baie d'Hudson devaient subir un temps d'arrêt de vingt ans jusqu'à celles de Franklin en 1845.

12. Pendant cette période d'activité, des efforts avaient été tentés pour explorer la côte orientale du Groenland. En juin 1822, le capitaine Scoresby s'ouvrit un passage au travers des masses de glace flottante qui avaient interdit à d'autres l'approche du Groenland et en découvrit les côtes depuis le 75° jusqu'au 69° vers le sud. Le capitaine Clavering obtint en 1823 le même succès depuis le 76° au 72°, et mit le capitaine Sabine à même de faire ses expériences sur les mouvements du pendule dans des stations presque inaccessibles. La mémorable tentative de Parry pour atteindre le pôle depuis le Spitzberg, avec des bateaux et des traîneaux, fut faite en 1827, et elle lui fit atteindre la latitude la plus élevée où un homme civilisé soit jamais parvenu, le 82°. En 1829 Graah, capitaine de la marine danoise, ajouta à l'exploration d'une partie des côtes occidentales du Groenland celle de la côte orientale depuis le cap Farewell jusqu'au 65° 18′, où il fut arrêté par une barrière

de glace qui le força de laisser encore une grande lacune de côtes inconnues jusqu'aux découvertes de Scoresby.

13. Le voyage de sir John Ross et de son neveu le commandant James Clarke Ross fut commencé en 1829 sur le petit navire la *Victory*. Descendant de l'entrée du Prince Régent au sud, ils découvrirent la terre qu'ils nommèrent Boothia Felix, située plus au sud que le point où s'était arrêté Parry dans son troisième voyage. Obligé de recourir à des explorations par terre, James Ross vit la côte nord de l'Île du roi William. Mais le grand événement de ce voyage fut la découverte du pôle magnétique faite par James Ross en 1831. L'absence des deux Ross dura de 1826 à 1833; et se trouvant obligés d'abandonner leur navire ils furent recueillis par un baleinier à l'entrée du détroit de Lancaster. Le capitaine Back avait entrepris, en 1833, un voyage sur le continent dans l'espoir de les retrouver par terre; voyage auquel on fut redevable de la découverte de la grande rivière du Poisson, et de son embouchure dans la mer arctique. De 1837 à 1839 messieurs Dease et Simpson comblèrent presque toutes les lacunes qui existaient encore dans le contour des côtes du continent, en ajoutant au résultat des travaux de Beechey et de Franklin entre la pointe Barrow et le Return Reef, l'espace compris jusqu'au cap Herschel sur l'île du roi William, à une courte distance de la position atteinte par James Ross à la pointe Victory. On dut aussi, en 1839, à Simpson la découverte d'une île considérable à laquelle il donna les noms de Wollaston et de Victoria. Le capitaine Lyon, sur le *Griper*, essaya en 1824 d'atteindre la Repulse Bay par Roe's Welcome, et revint dans la même saison. En 1836 le capitaine Back renouvela cette tentative par le détroit Glacé, mais il fut forcé d'hiverner dans les glaces fixes (pack) et effectua son retour en 1837 au travers de l'Atlantique sur son navire, la *Terreur*, près de couler bas.

14. Pendant la décade précédente, les Russes avaient poussé avec activité l'exploration des terres arctiques comprises dans les limites de leur empire. La plus grande partie des côtes sibé-

riennes était connue dès le siècle précédent, et les îles de la Nouvelle Sibérie avaient même été vues en 1770. Mais, en 1821, le lieutenant Anjou, de la marine russe, acheva une exploration détaillée de cet intéressant archipel. A la même époque, le baron Wrangel fit, de 1820 à 1823, quatre voyages dont le point de départ fut Nijni Kolymsk. Il descendit la Kolyma jusqu'à son embouchure et explora les côtes jusqu'au cap Chelagskoï dans des traîneaux attelés de chiens. Arrivé là, il entendit parler de montagnes neigeuses visibles vers le nord au delà des mers ; ces terres furent découvertes plus tard par le capitaine Kellett et revues par le capitaine Long. Une autre expédition russe commandée par Middendorf descendit en 1843 la rivière Khantanga et parvint en vue du cap Taimyr ou Taimoura et de la mer polaire.

15. En 1845 eut lieu le départ de sir John Franklin en quête du passage Nord-ouest. Depuis 1818 le progrès des découvertes avait été immense ; cependant un grand nombre n'étaient qu'ébauchées : ainsi l'espace compris entre le détroit de Barrow au nord, la côte continentale et les contours septentrionaux des îles Parry. L'amiral Lütke avait relevé, en 1825, les côtes orientales de la Novaïa Zemlia, mais rien n'avait été fait dans la direction du Spitzberg depuis le voyage de Phipps en 1773.

16. Sir John Franklin partit en 1845, avec les vaisseaux l'*Erebus* et la *Terror*. Remontant le détroit de Barrow et le canal de Wellington, il revint par le bras de mer qui sépare les îles Bathurst et Cornwallis, et hiverna sur l'île Beechey. L'année suivante, il doubla de cap Walker par le sud-ouest et fut alors pris dans les glaces, avec lesquelles ses deux navires furent emportés à la dérive et finalement arrêtés au nord de l'île du roi William. C'est là que mourut le brave chef de l'expédition, au mois de juin 1847, et quand les survivants entreprirent leur dernière et triste marche, ceux qui, en petit nombre, doublèrent le cap Herschel, découvrirent en réalité le premier passage Nord-ouest, en prouvant la continuité des mers arctiques entre la baie de Baffin et le détroit de Behring.

17. C'est aux expéditions envoyées ensuite à la recherche de l'*Erebus* et de la *Terror* qu'est due la découverte du vaste archipel qui couvre une si grande portion de la mer arctique. Sir James Ross fit, en 1848, le premier grand voyage en traîneaux avec le lieutenant M'Clintock, et démontra l'excellence de cette manière de voyager. Passant l'hiver au port Léopold, il fut ainsi conduit à suivre la côte occidentale du North Somerset jusqu'au cap Bird au sud.

18. En 1850 l'expédition du capitaine Austin partit d'Angleterre, avec le *Resolute* et l'*Assistance* sous le capitaine Ommanney, le *Pioneer* sous Sherard Osborn, l'*Intrepid* sous Cator; ils comptaient en outre M'Clintock, Allen, Aldrick, Browne, Mecham, Vesey Hamilton, M'Dougall et Clements Markham dans leur état-major. Le capitaine Austin fut obligé d'hiverner dans les glaces entre les îles Griffith et Cornwallis. Au printemps de 1851, il organisa un vaste système d'exploration qui procura de nombreuses découvertes géographiques. M'Clintock atteignit l'île Melville, et visita le Winter Harbour de Parry; Aldrich reconnut la côte occidentale de l'île Bathurst; Ommanney et Osborn découvrirent la terre du Prince de Galles, et en explorèrent la côte occidentale, tandis que Browne suivait la côte orientale; Mecham découvrit l'île Russell, dont le cap Walker forme l'extrémité nord-est; Vesey Hamilton fouilla les îles Lowther et Somerville; Allen se dirigea sur l'île Garrett, et les autres officiers explorèrent les côtes et les îles moins éloignées de l'hivernage. Au retour le capitaine Austin examina l'entrée du détroit de Jones dans la baie de Baffin, rectifiant les détails de la côte, pendant que les îles Cary étaient visitées par l'*Assistance*. En même temps Mr. Penny, capitaine baleinier, examinait, avec deux bricks sous ses ordres et des traîneaux, les deux côtes du canal de Wellington, et le vétéran sir John Ross, parti avec le petit navire le *Felix*, envoyait au travers de l'île Cornwallis une escouade commandée par le capitaine Phillips.

19. En 1851, une expédition particulière sous les ordres de

M. Kennedy, auquel s'était joint le lieutenant Bellot, hiverna avec le schooner le *Prince Albert* dans la baie Batty, sur la côte orientale du North Somerset, et découvrit le détroit, nommé plus tard détroit de Bellot, qui sépare le North Somerset de Boothia, détroit dont l'existence fait de cette dernière péninsule l'extrémité la plus septentrionale du continent américain.

20. En 1852, partit la dernière expédition frétée par l'amirauté, dont faisaient partie l'*Assistance*, commandée par sir Edward Belcher, le *Resolute* sous le capitaine Kellett, le *Pioneer*, l'*Intrepid*, et le *North Star* destiné à rester comme dépôt à l'île Beechey. Sherard Osborn, M'Clintock, Mecham et Vesey Hamilton faisaient partie de l'expédition de 1852—54 comme de la précédente. M'Clintock et Mecham y firent des prodiges dans l'emploi des traîneaux. M'Clintock découvrit les rivages septentrionaux des îles de Melville et du Prince Patrick, et les parages où niche la *mouette d'ivoire* (ivory gull). Mecham découvrit l'île Eglinton et les côtes occidentales et septentrionales de l'île du Prince Patrick. On dut à Vesey Hamilton la découverte de l'extrémité septentrionale de la terre de Sabine et celle des îles Vesey Hamilton et Markham, bien avant dans la mer polaire. Sherard Osborn et Richards explorèrent les côtes septentrionales des îles Bathurst et Cornwallis. Le principal résultat pratique de cette expédition fut la délivrance de l'*Investigator*, ce qui permit au capitaine M'Clure et à ses officiers d'effectuer la traversée du passage Nord-ouest.

21. En 1851, le capitaine Inglefield, dans une croisière d'été du petit vapeur l'*Isabel*, releva quelques portions des côtes de la baie de Baffin, du Whale Sound, et prouva que le détroit de Smith n'est pas une impasse.

22. Pendant la durée des expéditions navales d'Austin et de Belcher, l'exploration continentale avait été reprise. En 1848, sir John Richardson la conduisit, à la recherche de son vieux camarade Franklin, de l'embouchure du Mackenzie à celle de la Mine de Cuivre. En 1851, le Dr. Rae, au service de la Compagnie de la

baie d'Hudson, atteignit la mer polaire près de l'embouchure de la Mine de Cuivre, traversa le détroit du Dolphin et de l'Union et fouilla les côtes de la terre de Wollaston. Dans un second voyage, partie en traîneau, partie en bateau, il suivit vers l'est les côtes de la terre de Victoria. En 1854, nous le trouvons encore examinant la manière dont la péninsule de Boothia se lie au continent.

23. Les voyages les plus importants par leurs résultats géographiques furent ceux qui eurent pour point de départ le détroit de Behring. Au mois d'août 1849, le capitaine Kellett, sur le *Herald* découvrait, par 72° 51′ de lat. nord et 163° 48′ long. ouest, une île au delà de laquelle il aperçut une terre haute et prolongée. La carte dressée par lui peut encourager les navigateurs dans l'espoir de faire dans cette direction des découvertes importantes.

24. Cette première pointe fut suivie de l'arrivée de M'Clure et de Collinson en 1850. M'Clure, sur l'*Investigator*, doubla la pointe Barrow, terme du voyage antérieur de Beechey, puis le cap Parry au delà de l'embouchure du Mackenzie ; puis se dirigeant au nord, il découvrit la côte méridionale de la terre à laquelle Parry avait donné le nom de Banks, et pénétra dans l'étroit passage compris entre les terres de Banks et du Prince Albert, auquel il donna le nom du Prince de Galles, jusqu'à des îles où il fit son hivernage. Au printemps suivant (1851) on suivit la côte septentrionale de la terre du Prince Albert. Dans l'été, l'*Investigator* fut ramené à l'extrémité méridionale de l'île de Banks, puis poussé vers le nord, entre la terre et des glaces effrayantes, et finalement amené sur la côte nord-est, à la baie de la *Bonté Divine* (God's Mercy), d'où il ne devait plus sortir. M'Clure et son équipage durent, en l'y abandonnant, rejoindre à l'île Melville, en cheminant sur la glace, le *Resolute*, qui les rapatria par la baie de Baffin. Ils furent ainsi (1854) les premiers qui franchirent le passage Nord-ouest.

25. Pendant ce temps le capitaine Collinson sur l'*Enterprise* fit aussi voile au travers du détroit du Prince de Galles et revint

hiverner à son entrée méridionale. En 1852, une escouade de son équipage atteignit l'île Melville et découvrit ainsi un second passage nord-ouest. L'*Enterprise* se dirigea alors vers l'est en suivant la côte du continent, les détroits du Dolphin, de l'Union et de Dease ; elle hiverna encore à la baie de Cambridge, sur la côte de la Terre Victoria. Le capitaine Collinson fit, au mois de mai 1853, un voyage en traîneau qu'il poussa vers l'est jusqu'à une distance de quelques milles seulement de l'endroit où l'*Erebus* et la *Terror* avaient dû être abandonnés. L'*Enterprise* fut condamnée à passer encore un troisième hiver arctique à la baie de Camden, à l'est de la pointe Barrow, et ne fut rapatriée qu'en 1854.

26. Le rapport d'après lequel des Esquimaux auraient eu connaissance de la présence de sir John Franklin à l'île du roi William et à l'embouchure de la Grande Rivière du Poisson, fit encore équiper le *Fox*, sous les ordres du capitaine M'Clintock, accompagné du capitaine Allen Young. Le navire hiverna de 1858 à 1859 à l'entrée orientale du petit détroit de Bellot, et ce fut au printemps de 1859 que M'Clintock atteignit le but de tant d'efforts par la découverte du document qui constatait le triste sort de l'*Erebus* et de la *Terror*. Il fit lui-même le tour de l'île du roi William, tandis que Allen Young découvrait l'extrémité méridionale de la Terre du Prince de Galles, ce qui fut le trait d'union entre les découvertes faites par les expéditions d'Austin et de Sherard Osborn à l'ouest et celle de Browne à l'est. Allen Young établit aussi l'existence d'un passage conduisant au détroit de Barrow, qui fut nommé détroit de Peel.

27. Ainsi fut ajouté un vaste développement de côtes à celles qui sont représentées dans la carte de 1848.

28. En 1853, le Dr. Kane entreprit de conduire, sur le petit brick l'*Advance*, une expédition américaine de dix-sept hommes dans le détroit de Smith, à l'extrémité septentrionale de la baie de Baffin. Avec des moyens matériels insuffisants pour le but qu'il se proposait d'atteindre, le Dr. Kane se vit arrêté par les glaces à dix-sept milles seulement au nord du point qu'Inglefield avait atteint,

et forcé d'hiverner au port Van Rensselaer par 78° 37′ de latitude. Au printemps suivant (1854), Morton, attaché à l'expédition, accompagné d'un Esquimau et de chiens, s'avança vers le nord, par le bord oriental du détroit jusqu'au cap Constitution, qu'il place par 80° 56′ N. Les grandes souffrances d'un second hivernage forcèrent Kane et ses hommes d'employer l'été de 1855 à opérer leur retraite vers les établissements danois du Groenland.

29. Cinq années plus tard, une autre expédition américaine partit pour les mêmes parages, conduite par le Dr. Hayes qui avait fait partie de l'expédition de Kane. Sur le schooner *United States*, de 133 tonneaux, il hiverna au Port Foulke, par 78° 17′ lat. N., à quelques milles seulement en dedans de l'entrée du détroit de Smith; au printemps de 1861, le Dr. Hayes fit en traîneau un voyage où il suivit le bord occidental du détroit jusqu'à 81° 35′ de lat. N.

30. La découverte d'une terre au nord du détroit de Behring, faite par le capitaine Kellett, fut étendue par le capitaine Long, baleinier américain qui, au mois d'août 1867, s'avança jusqu'à 70° 46′ de lat. au nord de la Sibérie, le long d'une côte qu'il suppose habitée et qu'il nomma terre de Wrangell.

31. Ici les recherches des Suédois au Spitzberg appellent notre attention. Elles ont été l'effet de cinq expéditions consécutives, en 1858, 1861, 1864, 1868, et 1872, et elles ont fixé avec une exactitude scientifique la géographie de cet archipel. En 1868, le vapeur *Sophia* atteignit la latitude 81° 42′ N. sur le méridien 18° E., position plus avancée vers l'est que celles de Phipps et de Parry. Mais c'est surtout au professeur Mohn de Christiania qu'est dû le progrès des découvertes dans cette direction, par le soin avec lequel il a su rendre de simples pêcheurs norvégiens capables de faire des observations géographiques et d'en dresser le rapport. Sous ses auspices, le capitaine Carlsen fit, en 1863, le périple entier du Spitzberg; en 1864, trois capitaines norvégiens firent le tour de la Terre du Nord-Est, et en 1872, les capitaines Altmann et Johnsen retrouvèrent la terre de Wiche. M. B.

Leigh Smith s'aventura sur son yacht, en 1871, jusqu'à l'extrémité de la Terre Nord-Est du Spitzberg, dont il constata l'extension considérable vers l'est. Il atteignit aussi 81° 24′ de latitude. Les Norvégiens ont récemment encore étendu nos connaissances dans la direction de la Novaïa Zemlia. En 1869, Carlsen traversant le détroit de Jugar (Pet Strait) voyagea le long de la côte sibérienne jusqu'à l'embouchure de l'Obi; en 1871, il fit le tour de la Novaïa Zemlia, tandis que Mack, Johannesen, Tobiesen et d'autres exploraient la mer de Kara (Karskoïé Morïé) et que Rosenthal, avec le vapeur *Albert*, examinait le grand détroit de Matochkin.

32. Dans l'été de 1868, une petite expédition allemande conduite par Koldewey fit une excursion au Spitzberg et, en 1869, le même capitaine partit de Brême pour la côte orientale du Groenland avec le vapeur *Germania*, et la *Hansa* comme dépôt. Ce dernier navire, ayant été pris dans la glace, son équipage dut hiverner sur une masse de glace flottante et fut entraîné à la dérive presque jusqu'au cap Farewell. La *Germania* hiverna, par 74° 30′ de latitude, sur la côte orientale du Groenland au point où le capitaine Clavering s'était avancé en 1823. Au printemps de 1870, le capitaine Koldewey et le lieutenant Payer poussèrent en traîneau cent-cinquante milles plus au nord, par 77° N. où ils donnèrent le nom de Prince Bismark à un cap sourcilleux. Ils y découvrirent aussi un magnifique fiord pénétrant au loin dans les terres, et la *Germania* rentra à Brême en septembre 1870.

33. L'expédition Austro-Hongroise sous le capitaine Weyprecht et le lieutenant Payer, fit voile en 1872, dans l'espoir d'effectuer son passage par le nord-est; mais leur petit vapeur, le *Tegethoff*, fut enfermé par les glaces au nord de la Novaïa Zemlia et emporté à la dérive pendant l'hiver de 1872-73. Toujours enfermés, ils arrivèrent en vue d'une terre montagneuse le 31 août 1873, et, au mois d'octobre, Payer réussit à prendre terre sur une île par 79° 54′ N. Là ils passèrent un deuxième hiver, et au printemps de 1874, Payer, avec un équipage de traîneau, partit

pour explorer la région nouvellement découverte, qui reçut le nom de l'empereur François-Joseph. Elle est formée de trois grandes terres, qui reçurent les noms de Zichy, de Wilczek et du prince impérial Rodolphe, avec un grand nombre d'îles plus petites. Payer atteignit au cap Fligely la latitude de 82° 5′. Finalement les explorateurs furent obligés d'abandonner leur navire, et d'opérer leur retraite dans leurs canots, qui les portèrent heureusement au port de Wardœ, en Norvége, en septembre 1874.

34. En 1870, le capitaine Hall équipa une troisième expédition américaine pour le détroit de Smith, et mit à la voile en juin 1871 à bord du vapeur *Polaris* de 387 tonneaux. Il réussit à s'avancer l'espace de 250 milles dans la direction du pôle, et dans un bras de mer maintenant appelé Canal Robeson où, par 82° 16′ de lat. et le 30 du mois d'août, ils virent la mer libre vers le nord-est. La *Polaris* hiverna par 81° 38′ lat. à la baie Grâce à Dieu (Thank God) où le capitaine Hall mourut le 8 novembre 1871. Dans l'été suivant, 1872, la *Polaris* fut entraînée à la dérive jusque dans la baie de Baffin, et un des canots avec seize hommes à bord, y compris des Esquimaux, fut séparé du navire. Ils furent emportés sur les glaces, pendant tout l'hiver, jusqu'à l'extrémité de la baie de Baffin et furent enfin recueillis près des côtes du Labrador, le 29 avril 1873, par 53° 35′ de latitude. Le navire lui-même, avec le reste de l'équipage, passa le second hiver en vue de l'île Littleton, près de l'entrée du détroit de Smith.

35. Dans l'été de 1873, le capitaine A. H. Markham, maintenant commandant de l'*Alert*, entreprit, en compagnie du capitaine Adams, de conduire le vaisseau baleinier l'*Arctic* au golfe de Boothia par la baie de Baffin. Il mesura quelques grandes profondeurs, apporta quelques corrections au tracé de la côte méridionale du détroit de Barrow, à la baie Cresswell sur le North Somerset et à la pointe Garry, et rentra à Dundee en septembre 1873 avec les restes de l'équipage de la *Polaris* recueillis en route.

36. La carte circompolaire récemment exécutée par Stanford

montre l'étendue encore bien vaste des parages inconnus de cette région. C'est pour diminuer ces lacunes que dernièrement encore l'*Alert* et la *Discovery* sont partis de Portsmouth, le 29 mai 1875, et après un voyage orageux, ont atteint le Godhavn dans l'île de Disco, le 6 juillet, et fait voile pour Upernivik le 17 par le détroit de Waigat. Grâce à la vaillante persévérance du capitaine Allen Young, qui dans son vaisseau la *Pandora* a recueilli les lettres laissées aux îles Cary, nous avons encore appris que l'expédition, passant sans difficulté au travers des glaces de la baie Melville, est arrivée, le 26 juillet, en vue du détroit de Smith.

CLEMENTS R. MARKHAM.

IV.—Collection de Cartes des Mers antarctiques.

1. La collection de cartes des régions antarctiques est naturellement beaucoup moins grande que celle des régions arctiques. Le voisinage de l'Europe, l'importance de son commerce, le désir de lui ouvrir une communication avec l'Inde et le Cathay qui permette d'éviter les dangers du cap des Tempêtes, ont toujours contribué à attirer sur les mers arctiques des recherches plus actives, quoique l'on ait depuis longtemps renoncé à y trouver un passage facile par le nord-ouest ou par le nord-est.

2. Le premier voyage auquel on dut des découvertes fut celui de la *Bonne Nouvelle*, un des vaisseaux qui, au nombre de cinq, furent équipés à Rotterdam en 1599. Il était sous le commandement d'un nommé Dirk Gerritz, qui, en passant au sud du cap Horn, vit une terre qui doit avoir été le groupe des Shetland méridionales.

3. En 1675 La Roche découvrit la Géorgie du sud.

4. Quoique l'île Kerguelen puisse à peine être appelée une terre polaire, puisque la latitude australe où elle se trouve ne dépasse pas celle de l'Angleterre dans l'hémisphère septentrional, toutefois dans des parages où il y a si peu à décrire, ce fut une découverte importante. L'honneur en est dû à l'habile et malheureux français Yves J. Kerguelen, dont elle porte le nom, et qui signala deux îles au large de la côte occidentale, le même jour (17 janvier 1772) où son compatriote Marion fit la découverte de celle qui porte son nom. Le capitaine James Cook la visita dans son troisième voyage (1776-1779). Robert Rhodes ajouta beaucoup à la connaissance que l'on avait de cette île en 1799, en traçant une grande partie de ses côtes. Depuis lors James Clark Ross avec l'*Erebus* et la *Terror*, le capitaine Nares avec le *Challenger*, ont encore augmenté la connaissance des ports de Kerguelen.

5. L'application pratique du problème de la navigation sur un grand cercle du globe conduisit à la découverte des îles Heard et de M'Donald, faite l'une par Heard, capitaine de l'*Oriental* de la marine américaine, en novembre 1853, l'autre par le capitaine M'Donald. qui y passa deux mois plus tard sur le navire *Samarang*. Au capitaine Nares, qui les visita en février 1874, avec le *Challenger*, est due la carte exposée.

6. Le groupe des Sandwich passe pour avoir été découvert dès 1762.

7. L'île Auckland fut trouvée par Bristow en 1806. Elle fut visitée par Ross en 1840 et par l'expédition française de Dumont d'Urville l'année auparavant.

8. L'île Campbell, découverte en 1810 par Hazleburgh, fut aussi visitée par Ross en 1840.

9. Il est à noter que, bien qu'il ait coupé le cercle polaire antarctique en trois points sur une vaste étendue, Cook n'y fit aucune découverte.

10. L'expédition des vaisseaux russes *Vostok* et *Mirni* sous le commandement de Bellingshausen, eut comme celle de Cook pour résultat de constater l'existence de parages sans découvertes à faire, sauf les petites îles de Pierre et d'Alexandre, trouvées sous des latitudes jusque là inconnues.

11. En 1818, William Smith, de Blyth, retrouva les Shetland méridionales, et une terre plus au sud. Cette découverte fut confirmée par M. Bransfield, de la marine britannique, qui donna son propre nom à une autre terre. L'expédition française de 1838 y ajouta celle d'une côte qui reçut le nom du Prince de Joinville, et dont le capitaine James Clark Ross continua l'exploration en 1842-43.

12. Les Orkneys du sud furent découvertes le 6 octobre 1821, par le capitaine George Powell sur le sloop *Dove*.

13. Un voyage remarquable de Weddell, officier de la marine royale, avec les deux baleiniers *Jane* et *Beaufoy*, n'amena aucune

découverte, mais fut poussé, le 20 février 1823, jusqu'à 74° 15′, latitude extrêmement haute.

14. Le capitaine John Biscoe, au service de M. Enderby, armateur entreprenant, découvrit en février 1831, sous le 50° méridien E., une côte étendue et montagneuse à laquelle il donna le nom de son patron.

15. Elle fut reconnue vers l'est en 1833, par le voyage du capitaine Kemp à bord de la *Magpie*.

16. Biscoe, une année après sa découverte de la terre d'Enderby, aborda à la terre de Graham, qui s'étend au loin au sud et à l'ouest des Shetland.

17. L'*Eliza Scott* et la *Sabrina*, autres navires de la maison Enderby, commandés par M. Balleny, découvrirent en 1839, par 66¾° de latitude, une chaîne d'îles volcaniques, les îles Balleny, et quinze jours après une terre Sabrina.

18. Il est impossible de ne pas signaler la persévérance et l'énergie qui ont conduit d'intrépides marins à ces découvertes, avec des navires si faibles, au milieu de mers orageuses.

19. L'étude des phénomènes du magnétisme terrestre, à la tête de laquelle se placent l'illustre Gauss et Weber, a servi de stimulant à une partie de ces recherches, et ce fut en vue de déterminer la position du pôle magnétique antarctique que furent équipés en 1839 les vaisseaux l'*Erebus* et la *Terror*, dont le commandement fut confié à James Clark Ross.

20. Il fut précédé par le capitaine français Dumont d'Urville, qui donna les noms de Terre Adélie et de Côte Clarie à deux côtes découvertes sous le cercle polaire antarctique.

21. Ces mêmes parages furent en même temps parcourus par l'expédition américaine de Wilkes, qui y traça les contours d'une vaste terre qu'il prétendit avoir découverte, mais dont aucune trace ne fut retrouvée par Balleny, par Ross, ni plus récemment encore par le *Challenger*.

22. En novembre 1840, le capitaine Ross quitta le port d'Hobart-town dans la Terre de van Diemen, avec l'*Erebus* et

la *Terror;* après avoir visité les îles Auckland et Campbell et traversé au sud une zone de glace fixe, large de 200 milles, il découvrit, le 11 janvier 1841, la Terre de Victoria, dont les côtes ont un développement égal à celui des côtes de France entre Dunkerque et Bayonne. Il la suivit de la latitude 71° à 78°, où il s'arrêta devant le magnifique spectacle des volcans Erebus et Terror, dont le premier était en pleine éruption. Ce fut le terme d'un voyage qui eut aussi le mérite de faire connaître la position du pôle magnétique.

23. Deux voyages subséquents conduisirent Ross à la haute latitude de 78° 11′, sans rien ajouter aux découvertes antérieures, et il en fut de même de celui du capitaine Nares sur le *Challenger*, en 1874.

J. E. Davis.

V.—Collection de Cartes de l'Inde.

Une série de cartes de l'Inde fait connaître simultanément le développement de l'histoire et de l'administration de ce pays. Après les anciens plans, aussi bien pittoresques que topographiques, paraissent des itinéraires militaires, puis des cartes topographiques et administratives.

Des plans de Goa, de Bombay, de Cochin et de Quilon donnent une idée curieuse et intéressante de ces premiers établissements portugais. Il en fut autrement de l'établissement des Hollandais sur la côte occidentale de la péninsule indienne; on leur est redevable d'une série de belles cartes conservées à la Haye, et qui comprennent, outre les côtes du golfe Persique, de l'Inde, de Mascate, de Gombroon (Bender Abassi), des lagunes du Malabar, du golfe de Manar et du détroit de Palk, des plans de Cochin, et d'autres comptoirs, avec des vues coloriées et naïvement dessinées des villes et des forteresses. Plusieurs sont dues à l'éminent cartographe Van Keulen.

Lorsque les Anglais firent sur ces côtes leur première apparition, ils durent faire d'abord des emprunts aux travaux des Hollandais, leurs laborieux devanciers. L'infatigable hydrographe de la compagnie des Indes, Alexandre Dalrymple, emprunta, de 1779 à 1808, des centaines de cartes à l'atlas de Van Keulen et à d'autres ouvrages hollandais, à côté de celles qu'il fit exécuter. Le siècle dernier vit aussi paraître le "Neptune Oriental," publié par le français d'Apres de Mannevillette.

Mais aussitôt que les Anglais eurent pris pied sur le sol de la péninsule, ils furent amenés à rédiger des itinéraires militaires. Les premiers travaux vraiment géographiques parurent sous les auspices de Warren Hastings, le premier gouverneur-général. Il fit exécuter par le major Rennell des levers, qui l'occupèrent de 1763 à 1782, et qui produisirent entre autres en 1779 le

fameux Atlas du Bengale, encore précieux à certains égards. On fit aussi quelques emprunts à l'atlas français publié par d'Anville en 1752.

Le colonel Colin Mackenzie fut le premier auteur des levers trigonométriques, qu'il exécuta lui-même dans la présidence de Madras, de l'année 1783 à 1809, et il inspira l'idée de l'Ecole militaire de Madras qui, sous la conduite du capitaine Troyer, a doté la présidence de Madras d'une collection de belles cartes levées de 1811 à 1824. On entreprit même, en 1816, une carte sur une grande échelle destinée à représenter dans les territoires soumis à l'autorité du Nizam du Deccan, les étangs, les terres arrosées, celles qui étaient incultes ou privées d'irrigation. Ces précieux documents n'ont été que partiellement utilisés jusqu'ici, mais ils sont aujourd'hui admirablement lithographiés par M. Trelawney Saunders.

Le travail du major Rennell sur le Bengale, complété de 1807 à 1814, par le lever statistique du Dr. Buchan Hamilton, fut le prélude d'un travail semblable pour la vallée entière du Gange, poussé jusqu'à la mesure des hauteurs de la puissante chaîne de l'Himalaya. En 1800, le lieutenant Wood avait levé le cours du Gange depuis Allahabad jusqu'à Hurdwar à sa sortie des montagnes; en 1808, le capitaine Webb continuait ce travail depuis Hurdwar jusqu'à la source du fleuve au pied du Gangotri. On dressait aussi des itinéraires au travers des régions du Rohilcund, de l'Aoude, du Népal, du Bundelkund, de Bhopal et des monts Kamaons.

Comme l'insuffisance des travaux de D'Anville et de Rennell devenait évidente, Aaron Arrowsmith entreprit, en 1816, de mettre en œuvre ces divers matériaux dans la publication d'une carte générale de l'Inde en neuf feuilles et à l'échelle d'un pouce pour seize milles; elle fut la dernière qui reposât sur les données fournies par de simples itinéraires, car, dès 1822, le courageux éditeur publiait sa carte de l'Inde méridionale en dix-huit feuilles d'après les travaux trigonométriques du colonel Lambton et de

l'école de Madras, commençant au cap Comorin et s'étendant au nord jusqu'au fleuve Kistna. Toutefois, à cette époque, le Génie était depuis vingt ans à l'œuvre pour la grande triangulation de l'Inde entière, et les plans étaient arrêtés pour l'exécution d'une carte colossale en 177 feuilles, à l'échelle d'un pouce pour quatre milles, œuvre admirable, confiée d'abord pour la publication des feuilles au graveur John Walker, et qui se poursuit avec un redoublement d'activité et d'exactitude, ainsi que nous l'avons vu au début de cette étude. On conserve encore l'échelle en laiton qui a servi d'étalon à toutes les planches de cuivre. Les premières feuilles publiées en 1827 embrassaient la présidence de Bombay; puis parut le Bundelkund, œuvre du capitaine Franklin, et la région de l'Himalaya due aux travaux d'Herbert et d'Hodgson, qui est toutefois soumise à un nouveau lever.

Les travaux hydrographiques, marchant de pair avec la topographie continentale, donnaient le bassin du golfe Persique levé de 1820 à 1830, puis la fameuse carte de la Mer Rouge du capitaine Moresby, commencée en 1830 et achevée en 1834. Pendant ce temps Horsburgh, l'auteur du Guide aux Indes Orientales, avait succédé à Dalrymple comme hydrographe de la Compagnie des Indes, et avec la coopération de M. John Walker il utilisait les admirables travaux hydrographiques des officiers de la marine indienne par la publication d'une centaine de feuilles, de 1810 à 1836.

Pour établir l'assiette des impositions dans les provinces du nord-ouest (présidence d'Agra), il fallut des cartes spécialement détaillées dont l'exécution dura de 1822 à 1842. A la même époque la première guerre de Burmah conduisit à l'acquisition de connaissances précieuses sur les vastes territoires qui reculaient au loin vers le nord-est les limites des possessions anglaises. Les capitaines Bedford, Wilcox, et Burlton explorèrent la vallée du Brahmapoutra en 1825, tandis que le capitaine Pemberton levait les régions orientales de Munipur et de Cachar, et traversait au

nord les montagnes du Bhutan. Il réunit ainsi des matériaux qu'il employa, en 1838, à la publication d'une grande carte lithographiée des frontières nord-est de l'Inde. La guerre était ainsi aussi utile que la paix aux progrès de la géographie.

Sous la direction de sir Andrew Waugh, de 1843 à 1861, une grande activité fut imprimée aux travaux topographiques, et la publication du "Manuel du Topographe" du colonel Thuillier marqua, en 1851, une ère nouvelle dans l'histoire de la cartographie indienne. L'exécution des cartes cadastrales fut étendue jusqu'à l'Arracan et aux Sunderbunds dans la direction des bouches du Gange, et jusqu'au Douab de Jullundar dans la direction de l'Indus. Mais les travaux les plus précieux furent exécutés par les colonels Robinson et Montgomerie dans la région du Cachemire et dans le Douab, entre l'Indus et Sagar. Le travail du colonel Robinson comprit la chaîne des montagnes de Sel et toute la région montagneuse comprise entre l'Indus et son tributaire le Jhelum, région sillonnée par les marches classiques d'Alexandre, passant entre autres à Taxila, lieu de sépulture de Bucéphale, et par celles du Shah Nadir. Le travail topographique a pour stimulants dans ces parages les recherches archéologiques, l'importance stratégique et les travaux de l'agriculture. Le pays est difficile à dessiner, consistant en plateaux élevés, formés de marne et d'argile, assis sur des contours de grès et de calcaire, sur la chaîne salifère, et traversé par plusieurs chaînes qui courent de l'est à l'ouest parallèlement entre elles. Ces chaînes s'élèvent, quelques-unes comme des arêtes de poissons, les autres s'étendent en massifs de 10,000 pieds de hauteur, qui préservent le sol de la dénudation ; les fortes positions militaires y sont nombreuses ; mais la surface est découpée par des ravins profonds et compliqués. Le colonel Robinson commença en 1851 et termina en 1859 ce travail, qui a été lithographié avec une grande perfection par M. Walker en vingt-huit grandes feuilles, à l'échelle d'un pouce par mille.

Le lever du Cachemire a été exécuté par le colonel Mont-

gomerie conjointement avec la triangulation primordiale. C'est un travail admirable par la beauté de l'exécution, et par les difficultés qu'ont dû surmonter les ingénieurs, pour établir quelques-unes de leurs stations à des hauteurs de 20,000 pieds au dessus de la mer, étant exposés à de grands dangers et à de continuelles privations. Quatre feuilles ont été exécutées à l'échelle de un pouce pour deux milles et d'autres à celle de un pouce pour quatre milles.

En 1867, on commença de nouveau, sous la direction du colonel Priestley, un lever cadastral destiné à figurer une étendue de 60,000 milles, en y dessinant, outre les mouvements du terrain, les bois, les canaux, les étangs, les maisons, les terrains soumis à l'irrigation et les autres, le tout assis sur les données de la grande triangulation. En 1874, on avait déjà exécuté les plans de 17,941 villages à l'échelle de seize pouces pour un mille, et 79 cartes de district à l'échelle d'un pouce par mille.

Le colonel Thuillier succéda en 1861 à sir Andrew Waugh dans la direction générale de la carte indienne; son énergie et ses talents ont été dirigés en même temps vers les moyens d'améliorer les procédés topographiques et d'en rendre les résultats plus accessibles au public. Ses ingénieurs ont travaillé dans l'Inde centrale et le Radjahstan, dans l'Orissa et le district de Ganjam, et dans les montagnes sauvages de l'Assam; tandis que les travaux du cadastre s'étendent déjà aux provinces du nord-ouest et du centre, du Pendjab, du Sind, de l'Aoude, du Gange et du Burma britannique.

En 1866 les procédés de la photo-zincographie furent introduits dans le bureau du colonel Thuillier à Calcutta et ont grandement augmenté la somme de travail exécutée. Ils ont permis de publier un grand nombre de cartes d'ensemble réduites, au grand avantage du public; telles qu'une carte du Pendjab en quatre sections; celles de l'Assam et des Provinces nord-ouest, et une nouvelle carte générale condensée, à l'échelle d'un pouce pour 64 milles. Pendant l'année 1873 il n'en a pas

été tiré moins de 271,528 feuilles, dont 5,090 ont été envoyées en Angleterre.

En 1868 le colonel Thuillier a fait transporter à Calcutta l'exécution de ce qui restait à publier des feuilles de la grande carte originale, et la beauté de leur exécution justifie cette innovation en même temps qu'elle permet aux officiers anglais d'appeler à leur aide l'utile coopération des graveurs indous.

Sous la direction du colonel Walker, devenu en 1861 surintendant des travaux trigonométriques, une immense variété de cartes ont été dressées. On a terminé le lever du Cachemire, étendue de 70,000 milles carrés, présentant tous les aspects et tous les climats. Il n'y a pas une seule vallée de ces solitudes neigeuses de l'Himalaya où les ingénieurs n'aient porté leur travail. Mentionnons encore le lever des régions montagneuses du Kamaon et du Gurhwal, avec des feuilles plus détaillées pour les plantations de thé et pour les stations sanitaires, et celui des pays de Kattywar et de Guzerat dans la présidence de Bombay. La carte de la région du Ladak soumise au rajah de Cachemire a été complétée en 1867. En 1868, le colonel Walker publia en quatre feuilles une carte du Turkestan dont les éditions se sont multipliées depuis. Son collègue, le colonel Montgomerie, a aussi préparé, à l'échelle d'un pouce pour seize milles, une série de cartes des régions situées au delà des frontières britanniques, où il a consigné les villes, les villages, les rivières et les passages, mais pas les montagnes.

La cartographie n'a pas marché d'un pas aussi rapide dans la présidence de Bombay, où nous n'avons guère à mentionner, outre une carte domaniale du district de Kolapore, que le cadastre de l'île de Bombay, commencé en 1865 et terminé en 1872 par le colonel Laughton, formant une collection de 172 feuilles de 3 pieds de largeur sur 2 de hauteur, et représentant une surface de 22 milles carrés.

Depuis l'abolition d'une marine spécialement indienne, les études hydrographiques négligées ont nécessité la reprise de travaux, qui ont fait déjà sentir leurs résultats par la publication d'une excel-

lente carte des côtes comprises entre Sonmîni en Perse et Vingorla dans le Concan.

Les travaux d'exploration au delà des frontières ne se sont pas bornés à la carte du Turkestan du colonel Walker. La Mésopotamie a été levée par les officiers de la marine indienne, la Perse et le Beloutchistan par sir Frédéric Goldsmid, le major Saint-John et d'autres; des topographes indigènes, dressés par le colonel Montgomerie, ont rapporté du Tibet et du Turkestan oriental d'importants matériaux, et le capitaine Félix Jones, après plusieurs années de travaux et de recherches, a dressé en quatre feuilles une carte d'une exécution exquise des pays compris entre la Perse et la Méditerranée.

Quelques tentatives ont été faites pour faire servir les grands travaux topographiques, dont nous achevons l'esquisse, à la classification et à l'étude d'un certain nombre de notions de géographie, de physique et de statistique, telles que l'étendue des terres arrosées et autres, la quantité et la distribution des pluies, la profondeur des puits, le produit des terres. Quant à la nature géologique du sol, le seul document terminé est la carte publiée en 1853 par M. Greenough; mais une carte plus complète, encore inachevée, a été commencée en 1851 par le Dr. Oldham, et prendra rang à côté des cartes de Greenough pour l'Angleterre et de Griffith pour l'Irlande.

Les travaux cartographiques les plus importants et les plus abondants, sortent des bureaux du "Surveyor-general" à Calcutta. Chaque année on y publie de nouvelles feuilles de l'atlas, ainsi que les résultats des opérations topographiques et cadastrales.

Le quartier-général du surintendant du grand lever trigonométrique de l'Inde est dans la vallée de Dehra Doun, au pied de l'Himalaya, où s'exécutent les calculs et les réductions, les feuilles de la triangulation et du nivellement, et les cartes militaires destinées à l'usage des camps sous la direction des colonels Walker et Montgomerie. Le colonel Priestley poursuit les travaux

cadastraux à Madras et l'on en fait autant à Bombay. A Calcutta, le département hydrographique prépare des cartes destinées à être publiées par l'Amirauté. Enfin en Angleterre le Département de Géographie pour l'Inde est occupé à terminer les feuilles de l'Atlas indien, qui avaient été commencées avant que la publication en fût transportée à Calcutta.

Clements R. Markham.

GÉOLOGIE.

La géologie est la branche des sciences naturelles qui a pour objet l'étude de la structure et de l'histoire de la croûte terrestre. Le géologue doit commencer par rechercher l'effet des forces naturelles qui encore aujourd'hui amènent des modifications à la surface du globe ; ce sont par exemple les mouvements de l'atmosphère, l'évaporation, la condensation et la chute de l'eau, le cours des rivières et des glaciers, la distribution des climats, les secousses produites par les tremblements de terre et les volcans ; il doit également se rendre compte des conditions générales d'existence des plantes et des animaux. Éclairé par ces études préliminaires, il recherchera ensuite s'il peut trouver des preuves de changements survenus depuis l'origine des choses, soit dans le monde inorganique, soit dans le monde organique. Les principaux documents dont il dispose pour ce travail sont les minéraux, les roches et les fossiles.

Les appareils que nécessitent les recherches géologiques sont comparativement simples. Ce sont des collections d'échantillons pour l'analyse et la comparaison, des instruments pour les déterminer, les instruments pour relever une région, des cartes et des coupes pour indiquer les résultats des levers et pour grouper les données obtenues sur la structure géologique d'une contrée. L'on peut y joindre encore, surtout pour l'enseignement, des diagrammes, des modèles et d'autres illustrations qui aident à saisir les principes généraux de la science.

Les MINÉRAUX fournissent au géologue des données sur l'origine et sur l'histoire de la croûte terrestre. Laissant au minéralogiste l'étude de leurs propriétés optiques, de leurs formes cristallines, il s'attachera plus spécialement à la solution des questions suivantes : Composition chimique des minéraux, position dans laquelle on les rencontre, semblent-ils avoir été formés en même temps ou plus tard que les roches qui les entourent ? l'eau a-t-elle joué un rôle dans leur formation primitive, ou sont-ils d'origine ignée ? ont-ils subi plus tard d'autres modifications ? La chimie peut rendre de grands services au géologue pour la solution de ces problèmes ; elle ne peut cependant pas lui révéler la structure intérieure des cristaux, leur mode de croissance, le degré d'altération qu'ils ont subi ; ces points cependant une fois élucidés, peuvent jeter beaucoup de lumière sur l'histoire de masses immenses de roches. C'est par la voie des recherches micrographiques qu'ils doivent être étudiés.

Le microscope peut être rangé maintenant parmi les auxiliaires essentiels du géologue. C'est en 1829 que M. W. Nicol, d'Édimbourg, eut le premier l'idée de l'employer pour examiner des coupes minces de bois fossiles. Pour produire ces coupes, il fixait avec du baume de Canada le minéral par sa face polie, sur une plaque de verre, puis il l'usait jusqu'à ce qu'il eût atteint le degré de transparence voulue. Il est arrivé ainsi à découvrir la structure intime des végétaux fossiles, et il a pu se convaincre de leurs rapports avec les végétaux vivants. Il s'est fait peu de progrès dans cette direction jusqu'en 1856 ; à cette époque, M. H. C. Sorby, F.R.S., publia le résultat de ses recherches micrographiques sur la structure des minéraux et des roches. Procédant de la même manière que Nicol, il a reconnu dans diverses espèces de minéraux la présence de petites cavités remplies, les unes de liquides, les autres de gaz ou de vapeur, d'autres enfin de matière vitreuse ou pierreuse. De la nature des substances contenues dans ces cavités, il déduit la manière dont les minéraux ont été formés : par solution aqueuse, fusion ignée, sublimation ou par la com-

binaison de ces divers modes. M. Sorby remarqua en outre, que les cavités renfermant du liquide ne sont en général pas complètement remplies, mais qu'il reste un petit espace vide semblable à celui qui serait causé par le refroidissement et la contraction du liquide qui d'abord aurait occupé tout l'espace ; il a pensé qu'on pourrait par l'expérience ou par le calcul arriver à connaître la température et la pression sous lesquelles ces cavités se trouvaient au moment où elles ont été remplies. Ces observations ont ouvert une nouvelle voie aux études géologiques, voie dans laquelle on a réalisé depuis lors de grands progrès. L'un des meilleurs résultats obtenus a été la démonstration du grand rôle qu'a joué l'eau dans la production des roches cristallines. Le microscope a permis de s'assurer que le granit, par exemple, qu'on faisait dériver autrefois de la fusion ignée, s'est formé sous les influences combinées de la chaleur interne du globe et de l'eau souterraine. Ces recherches ont aussi jeté une vive lumière sur les modifications, parfois même les transformations complètes, qu'ont subies certains minéraux. On sait maintenant que l'eau a pénétré à travers les pores de certaines roches en apparence parfaitement solides et compactes, et a agi sur elles de diverses manières, enlevant certaines substances, ou en introduisant d'autres, et modifiant les combinaisons chimiques de la matière primitive. Cette action lente de l'eau se continue depuis les temps les plus reculés ; ce sont donc les roches les plus anciennes qui ont chance d'en montrer le mieux l'influence. Ainsi en résumé, le microscope en géologie s'applique surtout à l'étude de l'origine des minéraux et des modifications moléculaires subséquentes dont ils ont été le théâtre.

Les ROCHES, proprement dites, sont formées par l'aggrégation d'un ou de plusieurs minéraux. Elles diffèrent entre elles par leur composition, leur structure, leur origine et leur âge. Quelques-unes dérivent de la consolidation de matières fondues à la façon de la lave des volcans actuels. Toutes les roches de cette catégorie se distinguent par leur structure éminemment cristalline.

D'autres ont été formées par dépôt dans l'eau, comme nous voyons aujourd'hui du sable et du limon former des couches dans la mer et dans les lacs, ou de la chaux et du fer se déposer dans certaines sources, ou encore des fragments de coquilles, de coraux ou d'autres animaux s'accumuler en couches continues dans certaines parties du fond de l'océan. Les roches de cette seconde catégorie se distinguent par l'apparence fragmentaire et plus ou moins usée de leurs particules, ainsi que par leur arrangement en assises stratifiées. Une troisième catégorie de roches réunit les caractères des deux précédentes. Le gneiss, le schiste par exemple, semblent avoir été originairement des dépôts aqueux de sable, de gravier et d'argile, qui ont été plus tard recouverts par d'autres formations et engloutis profondément dans les couches terrestres, puis, sous l'influence de la pression et de la chaleur, ils sont devenus cristallins et ont pris ainsi de nouveaux caractères. Ce sont ces roches qu'on a désignées sous le nom de métamorphiques. Il n'existe pas de formation géologique sur la terre qui ne rentre dans l'une de ces trois classes : ignée, aqueuse et métamorphique.

L'étude des caractères chimiques et minéralogiques des roches forme le chapitre de la géologie qu'on a appelé pétrographie. Une collection bien arrangée et bien déterminée de roches types forme la base de cette étude ; elle permet à l'observateur de se familiariser avec les formes connues, de comparer les roches d'un district avec celles d'un autre, et de déterminer sur le champ celles qu'il rencontre sur son chemin. Dans les excursions, le pétrographe devra porter avec lui, outre son marteau et ses instruments d'arpentage, une forte loupe, un couteau de poche, une petite bouteille d'acide, un chalumeau pour l'examen des minerais. Ces instruments, tout à fait élémentaires, suffiront le plus souvent pour déterminer la place d'une roche dans une des trois catégories ci-dessus mentionnées.

Pour un examen plus approfondi il faut avoir recours à l'analyse chimique ordinaire. Le microscope enfin est le meilleur guide pour étudier la structure intime des roches. J'ai déjà indiqué

plus haut comment on en prépare les coupes minces, et quels sont les points spéciaux sur lesquels on peut par ce moyen obtenir des éclaircissements. On a construit depuis quelques années différentes machines propres à faciliter la confection de ces coupes minces. Les collections de préparations microscopiques sont précieuses par la facilité qu'elles offrent pour comparer les roches de différents pays.

Les FOSSILES sont les restes de plantes et d'animaux qu'on rencontre dans les diverses formations géologiques d'origine aqueuse. Ils y ont été déposés comme nous voyons aujourd'hui des restes analogues se conserver au fond de la mer, des lacs et des rivières. Au premier abord les fossiles pourraient sembler ne pas présenter d'autre intérêt que celui qui résulte de la comparaison entre des formes disparues et des formes actuellement vivantes. On n'a pas tardé cependant à se convaincre des services immenses qu'ils pouvaient rendre, soit dans les recherches géologiques en général, soit dans les applications pratiques de cette science. William Smith a montré le premier que, grâce à leurs fossiles caractéristiques, certaines couches de roches pouvaient être suivies d'une contrée à une autre, et peu à peu, en élargissant ce point de vue, on en est arrivé à établir l'existence d'une série d'êtres organisés qui partant des formes les plus simples, contemporaines des origines de notre globe, arrive jusqu'à celles qui vivent maintenant sous nos yeux. Chaque période géologique a sa faune et sa flore particulière, dont les types plus ou moins complets nous ont été conservés dans les couches de sable, de limon, de calcaire qu'on rencontre à tous les étages. Les couches les plus anciennes se trouvent naturellement au dessous des plus récentes, et leur ordre chronologique une fois établi, le géologue peut arriver à les reconnaître sur le globe entier, grâce à leurs fossiles, sans avoir à se préoccuper des différences de couleur, de composition, etc., qu'elles peuvent présenter. Par la même méthode, l'observateur partant d'une région où les couches ont gardé leur position primitive, pourra résoudre le problème que présentent d'autres districts, où les

couches ont été renversées, rompues, déplacées de diverses manières. L'histoire géologique de notre globe repose en majeure partie sur des recherches et des comparaisons de cette nature.

S'agit-il des applications pratiques de la géologie? faut-il, par exemple, suivre un filon ou un dépôt particulier à travers une certaine formation? la connaissance des fossiles sera très-précieuse pour y parvenir. Supposons, par exemple, trois grandes séries de roches A, B, C, assez semblables quant à leur caractères extérieurs, mais dont la troisième, celle qui est la plus superficielle, renferme seule des veines importantes de charbon. Les fossiles des trois séries différeront probablement entre eux, et sans ce fil conducteur le géologue pourrait être fort embarrassé de retrouver la couche carbonifère dans une région séparée de la première par la mer, par les lacs, par des terrains bouleversés d'éruptions volcaniques, etc. Partout où il ne rencontrera que des fossiles A ou B, il n'aura pas l'espoir de trouver de charbon; mais il saura qu'il a devant lui les couches placées immédiatement au dessous de celles qui le renferment. Rencontre-t-il, au contraire, des fossiles du groupe C, il se croira autorisé à rechercher de plus près les traces du précieux minéral.

Des collections de fossiles caractéristiques sont donc aussi importantes pour le géologue occupé à des recherches originales, que pour celui qui est chargé de l'enseignement de cette science. L'œil familiarisé avec les types principaux pourra facilement s'orienter dans une région inconnue. Enfin des fossiles provenant de différentes régions du globe permettront de faire des comparaisons intéressantes entre les organismes éteints et les organismes vivants, et de jeter les bases de l'histoire de la vie sur notre planète.

La géologie comme science est loin d'être limitée à la recherche, l'arrangement, la description des minéraux, des roches et des fossiles. Un savant, en connaissant toutes les espèces et les variétés, peut être un bon minéralogiste, un pétrographe distingué ou un excellent paléontologiste, sans pour cela pouvoir être

appelé un géologue. Il ne suffit pas en effet de connaître les échantillons tels que nous les offrent nos musées, il faut encore être à même de les reconnaître dans la nature. Le géologue ne tardera pas à comprendre que les matériaux solides dont est formée la croûte terrestre n'ont pas été accumulés au hasard, mais que des lois générales ont présidé à leur distribution. C'est ainsi que les roches déposées dans l'eau sont toujours arrangées en couches parallèles plus ou moins régulières, formant la plus grande partie de la croûte terrestre que nous pouvons observer directement. Ces couches, d'après les indications que fournissent les restes organiques dont elles sont remplies, ont été déposées les unes dans l'eau douce, les autres (les plus nombreuses) dans la mer. La présence de coquilles marines dans les roches actuellement élevées de plusieurs milliers de pieds au dessus de la mer est une preuve des changements de niveau qui se sont produits. Ailleurs le géologue reconnaîtra que les roches les plus anciennes d'un pays ont été bouleversées avant le dépôt des couches suivantes, que celles-ci ont subi le même sort à leur tour; il démontrera ainsi que certaines chaînes de montagnes ne sont pas dues à un soulèvement unique, mais qu'elles résultent au contraire de plissements successifs qui se sont produits à de longs intervalles. Les fossiles lui indiqueront l'ordre chronologique de ces phénomènes, et il pourra ainsi comparer l'âge relatif de différentes chaînes de montagnes. Ailleurs il retrouvera la trace de ruptures qui ont disloqué certaines couches de roches, et il pourra apprécier l'importance des déplacements qui se sont produits et qui se mesurent quelquefois par plusieurs milliers de pieds. Dans les périodes anciennes, la surface du globe était comme aujourd'hui parsemée de bouches volcaniques, laissant échapper des vapeurs chaudes, des gaz, des cendres, des matières en fusion. Les courants de laves peuvent être suivis à travers les couches stratifiées, et les fossiles ensevelis dans le voisinage indiquent si l'éruption a eu lieu sur terre ou sous les eaux. Partout enfin, dans les vallées comme sur les collines, éclatent les témoignages

évidents des modifications profondes qu'a subies la surface de la terre, modifications qui bien souvent n'ont eu d'autres causes que l'action lente mais irrésistible de la pluie, de la gelée et d'autres agents, lesquels finissent par faire tomber en poussière les roches les plus solides.

Les différentes données que fournit l'étude géologique, les différents faits qu'elle a découverts doivent, pour pouvoir être facilement saisis, se trouver réunis sur une carte spéciale. On doit y faire figurer les surfaces qu'occupent les diverses catégories de roches, l'angle et la direction de l'inclinaison des couches, la position et l'importance des failles, etc. La carte géologique la plus détaillée qui ait encore été dessinée est probablement celle de la Grande-Bretagne et de l'Irlande, à l'échelle de six pouces par mille anglais, soit $\frac{1}{10560}$. La plupart des nations civilisées font faire des relevés géologiques de leur pays, pour déterminer les ressources minéralogiques que recèle leur territoire, et aussi pour l'avancement de la science pure.

Une des conditions essentielles d'un relevé géologique est la possession d'une carte topographique à une échelle suffisante pour qu'on y puisse noter les observations faites. S'il n'en existe pas auparavant, le géologue assisté de ses aides doit d'abord la dresser. Dans les pays neufs on combine en général la géographie avec l'exploration géologique; ainsi se conduisent les travaux de levers de sir William Logan au Canada et ceux du Dr. Hayden dans les Montagnes Rocheuses. Dans les états d'un développement plus ancien, la création d'une carte topographique a précédé en général les études géologiques. En Angleterre, la Commission géologique emploie les cartes de l'état-major à l'échelle d'un pouce et de six pouces pour un mille. Muni de ce premier document, base de tous ses travaux, le géologue n'a plus besoin de s'embarrasser d'instruments d'arpentage. Il lui faut un marteau, pas trop pesant, suffisant toutefois pour lui permettre de casser les fragments de toutes les roches, afin d'en étudier la nature intérieure. Il doit aussi porter avec lui une petite loupe

pour étudier la structure et les cristaux des roches et des fossiles ; un clinomètre, aussi simple et aussi portatif que possible, pour mesurer l'inclinaison des couches ; une boussole azimuthale pour prendre des points de repère et pour déterminer la direction de l'inclinaison des couches, les lignes de failles, etc. ; un petit rapporteur pour placer exactement ses observations sur la carte ; une série de crayons de différentes couleurs pour les différentes formations, et enfin un carnet où il consigne les notes trop détaillées pour figurer sur la carte. Ces quelques instruments tous parfaitement portatifs suffisent au géologue pour mener à bien ses observations, même dans les régions les plus compliquées. Pour ne pas trop charger la carte, il est urgent de remplacer les mots par un système de signes et de traits représentant les différents terrains. Dans une campagne un peu prolongée, il est prudent de passer de temps à autre les traits de crayons à l'encre ; on différencie alors les diverses formations en les colorant de nuances variées. À mesure qu'on avance, on recueille en même temps des échantillons pour les collections. Si les levers ont été faits sur une carte à trop grande échelle, il faut souvent la réduire avant de la publier. C'est ainsi qu'en Angleterre la Commission travaille sur la carte à l'échelle de six pouces, et publie à l'échelle d'un pouce (sauf pour les terrains miniers).

Les couleurs employées pour désigner les différentes formations sont naturellement conventionnelles, et peut-être l'état actuel de la science ne permet-il pas encore l'adoption d'un système uniforme et général. Sans aller tout à fait aussi loin, on pourrait cependant adopter dans tous les pays civilisés certaines teintes ou certains procédés graphiques pour quelques roches particulières. La carte géologique d'un pays, serait ainsi un livre ouvert à tous les géologues d'autres pays. Actuellement, chaque nation ayant son système particulier, l'examen de chaque carte impose au géologue toute une étude préliminaire sur le sens des couleurs. L'emploi de l'impression en couleur facilite beaucoup le travail de publication des cartes.

Les cartes géologiques à une échelle suffisante pour permettre l'introduction de tous les détails qu'il importe de connaître sont rares. On y supplée au moyen de coupes horizontales ou verticales, les premières indiquant la structure spéciale d'un district, les secondes la succession des roches en un point donné.

Les coupes horizontales sont des diagrammes montrant l'arrangement des roches entre deux points donnés, tel qu'on peut l'observer ou le déduire par le raisonnement. Elles ne sont parfaites qui si elles sont dessinées à une échelle vraie, c'est-à-dire les hauteurs et les longueurs ayant la même proportion. Dans les pays de plaines et à structure géologique simple, ce dernier point est peu important ; mais dans des régions montagneuses où les couches ont été plus ou moins bouleversées, où on peut conclure de la forme de la surface à la structure intérieure, les coupes horizontales à l'échelle vraie sont les seules qui aient de la valeur. On trouvera des exemples de l'application de cette règle dans les coupes du *Geological Survey* du Royaume-Uni dressées à l'échelle de six pouces par mille. Le nivellement en a été fait directement sur le terrain par les géologues, ou relevé sur les cartes de l'état-major.

Les coupes verticales représentent, tantôt la série verticale des formations dans une certaine région, tantôt les couches successives exactement mesurées en un point spécial, tel, par exemple, qu'un puits de mine. Pour donner un image satisfaisante, elles doivent être dessinées à une échelle plus grande que les profils horizontaux. À peine est-il besoin d'ajouter, que les détails qui ne peuvent pas être convenablement rendus par un des procédés graphiques que nous venons d'énumérer, sont décrits dans des mémoires spéciaux.

Il nous reste à mentionner en terminant les moyens par lesquels les professeurs de géologie peuvent parler directement aux yeux de leurs élèves. Ils ont d'abord les collections de roches, de minéraux et de fossiles dont nous avons déjà parlé et qui, bien choisies et bien disposées, peuvent en un moment apprendre plus

que ne le feraient toutes les descriptions écrites ou orales. Elles tendent en même temps à développer l'esprit d'observation et concourent ainsi à l'éducation générale. Des modèles de formations géologiques sont aussi fort utiles pour aider à comprendre les principaux traits de la structure du sol. Les uns seront par exemple construits pour démontrer aux élèves les phénomènes des failles, l'inclinaison des couches, l'influence des dénudations superficielles sur les couches stratifiées, l'apparence générale des filons, les différents modes usités pour l'exploitation du charbon ou d'autres minerais. D'autres, au contraire, seront destinés à la reproduction d'une région particulière, riche en traits caractéristiques, qu'il serait difficile de faire bien saisir aux élèves sur le terrain. Enfin les diagrammes entrent pour une part importante dans les ressources dont dispose le professeur de géologie ; ils suppléent à l'insuffisance des collections de fossiles, ils font comprendre aux élèves les formes de plantes et d'animaux disparus, et ils aident à graver dans la mémoire les faits de géographie physique et de géologie qu'ils représentent. On ne saurait donc attacher trop de prix aux séries bien choisies et bien exécutées de diagrammes; elles fournissent une excellente base à l'instruction et sont par cela même une garantie du développement ultérieur de la science.

A. GEIKIE.

APPAREILS SCIENTIFIQUES RELATIFS À L'EXPLOITATION DES MINES.

Depuis le simple marteau manié par la main de l'homme jusqu'à la puissante machine à vapeur qui sous un petit volume accomplit le travail de cinq cents chevaux, les nombreux engins qui sont employés dans les travaux de mines peuvent tous, dans un certain sens, être qualifiés d'appareils scientifiques. Mais quoique les règles de leur construction et de leur mise en œuvre reposent absolument sur des principes scientifiques, on peut dire qu'ils sortent des limites de cette catégorie d'appareils une fois qu'ils figurent comme de simples rouages dans le travail quotidien des établissements miniers.

On peut faire une exception pour les instruments qui servent à mesurer et à enregistrer les directions des gîtes et les phénomènes météorologiques, et à résoudre des problèmes numériques ; néanmoins on est obligé de reconnaître un caractère un peu arbitraire à la ligne de démarcation qui sépare les objets appropriés à la présente Exposition d'avec d'autres exemples de l'application des principes scientifiques aux machines, lesquels seraient mieux à leur place dans une Exposition industrielle.

Appareils pour le Lever des Plans.

Il y a longtemps que l'aiguille aimantée a été employée pour déterminer la direction des veines et autres gîtes de minéraux utiles, et pour reporter sur le papier la situation et le développe-

ment des travaux de mines. Vers l'an 1550 de notre ère, George Agricola (Bauer) décrit très au long la construction de l'instrument servant à cet usage, et formé d'une série de cinq à sept cercles concentriques, au milieu desquels était une dépression contenant l'aiguille (*magnetinum indicem*). Les cercles étaient divisés, comme c'est souvent encore le cas pour les boussoles du continent, en deux fois douze parties ou "heures." Pour certains problèmes on s'alignait sur des cordes tendues avec des plombs, et un quart de cercle gradué muni d'un fil à plomb (*libella stativa*) servait à observer les variations de niveau.

Au milieu du dernier siècle, il paraît que le lever des plans souterrains à la boussole continuait à être pratiqué sans grand changement dans les instruments. "Les instruments employés," dit le docteur Pryce,* "sont une boussole sans gnomon ni style, mais portant en son centre une aiguille pour suspendre à un fil ou pour y adapter une bougie, fixée dans une boîte de six, huit ou neuf pouces carrés, garnie d'une forte glace, dont la surface est de niveau avec celle de la boussole, et munie d'un couvercle également de niveau avec la partie supérieure de l'instrument; une règle divisée de vingt-quatre pouces ou deux pieds; une ficelle ou petite corde avec un plomb au bout; un petit support pour placer la boussole horizontalement; des piquets et des jalons en bois, un morceau de craie, des plumes, de l'encre et du papier." Une corde était tendue d'une des extrémités de la galerie à l'autre, le côté de la boussole était placé, "bien parallèlement à cette ligne," et la direction indiquée par la pointe de l'aiguille était notée sur le papier.

Le même auteur donne un avertissement à "ceux qui ne prennent pas note des angles de la boussole, mais, au lieu de cela, font une marque à la craie sur le bord de la boussole au droit de la ligne qu'ils relèvent; car s'ils ne sont pas excessivement soigneux et précis dans cette opération, ils peuvent commettre des erreurs presque impardonnables et irréparables. En effet, anciennement, avant que l'écriture et les plans fussent aussi géné-

* "Mineralogia cornubiensis," par W. Pryce: Londres, 1778.

ralement compris et pratiqués parmi les simples ouvriers des mines d'étain que c'est le cas maintenant, beaucoup de nos mines et galeries étaient relevées de cette manière."

Le cadran fut ensuite muni de pinnules, qui pouvaient ordinairement se replier sur la boîte de la boussole, et au moyen desquelles la direction de la galerie pouvait se prendre sur des fils à plomb verticaux ou sur des flammes de bougie. Un demi-cercle gradué en deux fois 90° est souvent fixé, dans les instruments les plus modernes, à l'alidade qui porte les pinnules. La grande irrégularité des galeries dans les mines métalliques, et leur peu de hauteur, conduisirent à l'adoption de la boussole suspendue, qui est maintenant d'un grand usage dans les mines du continent, et qui, dans les mains d'observateurs soigneux, peut donner des résultats d'une étonnante exactitude. La corde à laquelle la boussole est suspendue peut être tendue par des vis qu'on tourne avec une manivelle, et ordinairement, dès qu'elle est convenablement tendue, on en prend l'inclinaison au moyen d'un léger demi-cercle de laiton, pourvu d'un index très-sensible qui se place verticalement en vertu de son poids.*

Dans notre siècle, l'emploi des plaques tournantes en fonte et des rails en fer laminé, qui s'est rapidement répandu dans les travaux souterrains, introduisit une nouvelle et grave cause d'erreur dans les levers basés sur les indications de la boussole. En outre, sans parler de l'action de certaines sortes de minerais de fer, il y a de nombreuses mines dans lesquelles les masses rocheuses sont capables d'affecter l'aiguille aimantée à un degré notable. De récentes recherches sur la pétrologie microscopique ont révélé l'existence de la magnétite dans beaucoup d'endroits où on ne se serait guère attendu à en rencontrer. C'est pourquoi, depuis une cinquantaine d'années, on a adopté sur une grande échelle diverses formes de graphomètres et de théodolites, instru-

* Pour les figures et l'explication complète de ces instruments, voyez : Combes, "Exploitation des Mines," Paris, 1845 ; et Lang von Hanstadt, "Anleitung zur Markscheidekunst," Pesth, 1835.

ments dans l'usage desquels on compte les azimuts à partir d'une ligne fixe, ce qui rend l'aiguille aimantée inutile, et qui permettent d'exécuter complètement un lever en déterminant les azimuts à l'aide du réticule d'une lunette, et d'un vernier qui donne la lecture des angles à trente secondes près.

Les efforts qu'on a faits pour introduire dans les mines un instrument plus exact que les anciennes boussoles ont montré qu'on peut quelquefois employer ceux qui servent pour les levers de surface, mais les exigences des mines nécessitent généralement certaines différences dans la disposition, spécialement en vue de la facilité du transport et de la facilité d'emploi dans les passages étroits, bas ou tortueux. Feu M. Combes, professeur à l'École des Mines de Paris, a imaginé pour le travail souterrain un théodolite dont la lunette est reliée à un cercle vertical gradué pour donner les inclinaisons ; cet instrument a reçu des modifications, entre autres, comme on le sait, dans le théodolite excentrique de MM. Stackpole de New-York, récemment décrit par le professeur Vinter de Columbia-College. Un avantage important qui est lié à cette disposition, c'est que l'on peut ainsi mesurer n'importe quel angle vertical sans être gêné par le limbe horizontal, à la condition, bien entendu, de faire une correction pour l'excentricité.

La méthode consistant à soutenir l'axe de la lunette comme celle d'un instrument des passages a été aussi appliquée dans les levers souterrains, comme dans le théodolite des passages de M. H. D. Hoskold,* et dans l'instrument très-usité aux États-Unis sous le nom de " engineer's transit " (instrument des passages à l'usage des ingénieurs). Ceux que construisent Heller et Brightly à Philadelphie sont décrits par le professeur R. W. Raymond comme d'excellents instruments des passages ; ils pèsent seulement 5½ livres, sans compter le pied, qui en pèse 3½. L'aiguille a trois pouces de longueur, et le limbe est divisé en demi-degrés. Une lampe lestée par un poids, et d'une forme commode, est

* " A Treatise on Mining and Surveying," H. D. Hoskold. Londres : Atchley et Cie., 1863.

destinée à être employée en même temps que ces instruments, soit pour viser des cordes auxquelles ces lampes sont suspendues, soit pour bissecter la flamme.

Il faut ajouter ici que de très-bons levers, particulièrement sur des étendues limitées, sont encore exécutés avec la boussole du mineur; et on doit reconnaître qu'en général on peut attendre de meilleurs résultats d'un instrument grossier, manié par des mains expérimentées, que d'un instrument supérieur moins habilement employé. L'ancienne boussole suspendue a beaucoup de partisans, et Adolphe Plaminek* en propose une nouvelle espèce dans laquelle les azimuts sont lus avec un vernier et une loupe des deux côtés. Le limbe est divisé en heures, degrés et demi-degrés, et il est en aluminium, ainsi que les parties qui le relient à l'aiguille. Du moment qu'on emploie l'aiguille, il est indispensable pour l'exactitude qu'on tienne compte de ses irrégularités avec les précautions et les observations voulues. Dans nos mines on ignore généralement ce que c'est que la variation séculaire ou la " déclinaison" de l'aiguille aimantée, et quand un plan se compose de levers faits successivement en plusieurs années, il ne peut pas prétendre à une véritable exactitude. Aux mines de Przibram, en Bohême, une ligne méridienne est tracée dans le bureau des plans (*markscheiderei*), et on y fait souvent des observations avant et après midi pour déterminer la variation diurne, dont la grandeur varie suivant les localités, et qui peut être ainsi la cause de nombreuses erreurs.

Dans le système dont nous parlons, la même boussole qui a servi au lever est ordinairement adaptée à un châssis qui remplit l'office de rapporteur, ce qui permet de s'en servir directement pour rapporter le lever sur le papier.

Dans certains cas où on est indécis sur le chemin à suivre pour faire une percée entre deux excavations, on s'est servi d'une aiguille délicatement équilibrée pour répondre à l'action d'un aimant puissant, placé de l'autre côté de la barrière rocheuse qui

* Berg- und Hüttenmännisches Jahrbuch, tome xxii.: Vienne, 1874.

l'en sépare. Il serait intéressant d'avoir des détails sur la nature et les résultats de ces expériences.

Enfin l'aiguille aimantée à été l'objet d'une autre application, savoir la recherche des gisements de minerai de fer magnétique. En Suède, où cela se fait souvent, on l'emploie sous forme d'aiguille d'inclinaison.

Éclairage des Mines.

À la fin du dix-huitième siècle, lorsqu'on rencontra de grandes difficultés dans l'exploitation de certains gisements de charbon qui dégagent du grisou, beaucoup de systèmes d'un caractère plus ou moins scientifique furent essayés pour éclairer sans danger d'explosion. La réflexion de la lumière du jour sur une série de miroirs, la phosphorescence de matières animales en décomposition, et les étincelles produites par le choc d'un morceau de silex contre les dents de la roue tournante du "moulin d'acier," étaient autant de méthodes dont on ne pouvait attendre qu'une faible lueur, qui dans certains cas devait néanmoins être la bienvenue. On s'est particulièrement fié à ce dernier appareil dans beaucoup de houillères, mais à la longue plusieurs exemples ont prouvé qu'il pouvait être aussi une cause d'explosion.

L'invention faite par Sir Humphrey Davy, en 1816, d'un cylindre de treillis métallique, qui empêchait la flamme placée dans son intérieur de se communiquer à l'atmosphère explosive extérieure, ouvrit une nouvelle ère pour les mines de charbon. La jauge d'abord indiquée pour la lampe de sûreté, celle de 28 fils par pouce linéaire, ou de 784 ouvertures par pouce carré, est encore presque universellement en usage, quoique l'on s'en écarte dans certains districts. Les dimensions sont aussi les mêmes que celles des premières lampes fabriquées sur une grande échelle, quoique, pour le diamètre et la longueur, et par conséquent pour le volume de flamme qu'elles sont appelées quelquefois à contenir, elles dépassent les lampes d'essai construites à l'origine par Davy.

Mais le nombre et la variété des lampes de sûreté qu'on a proposées depuis cette époque sont si considérables, et beaucoup d'entre elles se sont montrées si impropres à l'usage, que nous croyons devoir profiter du peu d'espace dont nous disposons pour signaler les principaux désiderata à remplir, et mentionner les sortes de lampes qui ont reçu un emploi un peu important dans la pratique courante.

La simple lampe de Davy, comme l'avait déjà signalé son illustre inventeur, n'offre plus de sécurité dès qu'elle est exposée à un courant d'air dont la vitesse dépasse cinq à six pieds par seconde. Des expériences récentes ont montré que, avec une vitesse de huit pieds, elle laisse passer la flamme; il en résulte que si elle est exposée à un fort courant d'air impur venant des travaux, ou à l'action d'un ventilateur, ou à la vibration d'une onde aérienne lancée d'une distance considérable, elle cessera d'être une sauvegarde.* Une autre objection contre son emploi est l'insuffisance de sa lumière, qui rend le travail à flamme nue comparativement avantageux.

Le Dr. Clanny a fait en verre épais la partie inférieure de l'enveloppe cylindrique; George Stephenson a ajouté, en dedans du cylindre en toile métallique, un cylindre de verre qui occupe toute la longueur de la lampe, et il a introduit l'air nécessaire à la combustion par de très-petits trous situés dans le rebord sous le verre. Ces types adoptés et modifiés soit en Angleterre soit sur le Continent, ont donné une grande variété de résultats quant à la quantité de lumière donnée et quant à la facilité de la combustion. Aucune de ces lampes n'a donné autant de satisfaction ni inspiré autant de sécurité que celle de Mueseler, qui est principalement employée en Belgique, et qui en ces dernières années a été introduite dans plusieurs des plus grandes mines du nord de l'Angleterre et du Pays de Galles. Dans cette lampe une cheminée conique centrale facilite un tirage montant et un tirage descen-

* Voyez un mémoire de M. W. Galloway. Proc. R. Soc., juin 1874, et Trans. North. Inst. Eng.

dant qui occasionnent une combustion vive et une bonne lumière et éloignent ainsi la tentation de dévisser la lampe. Elle est sujette cependant à deux défauts : en premier lieu, le fait que le passage a lieu pour une vitesse de l'air qui n'est guère plus grande qu'avec la lampe de Davy ; en second lieu, la fragilité du verre, laquelle fait d'une monture soignée, des précautions dans le transport et d'une suspension bien verticale, des éléments importants de sécurité.

Une multitude de systèmes inventés pour fermer les lampes d'un manière certaine, afin d'en empêcher l'ouverture frauduleuse, d'extincteurs automatiques, et d'appareils destinés à trahir l'auteur de la fraude, ont été introduits avec plus ou moins de succès. Ainsi la forme ordinaire de serrure, qu'on crochète si facilement, est remplacée avec avantage par l'épingle de plomb qu'on introduit à travers les rebords contigus du dessus et du dessous de la lampe, et qu'on scelle par un procédé quelconque lorsque la lampe est remise aux hommes partant pour leur travail. Il faut citer aussi la serrure magnétique exposée à Paris en 1867 par M. Arnould, de Mons, et maintenant brévetée par MM. Craig et Bidder, au moyen de laquelle on ne peut enlever le dessus que quand la lampe est placée sur les pôles d'un puissant aimant. Quant aux nombreuses méthodes par lesquelles le fait de dévisser la lampe amène l'extinction de la lumière, il est à croire qu'elles seront de peu de valeur tant que les hommes pourront avoir des lucifers ou des allumettes de "sûreté" dans leurs poches !

Depuis les expériences et le rapport d'un comité nommé par l'Institution des Ingénieurs du nord de l'Angleterre, plusieurs variétés de lampe ont été produites ; quelques-unes ont été spécialement construites en vue d'empêcher le passage de la flamme, et on a constaté qu'en effet elles résistaient à l'action d'un courant d'air dont la vitesse pouvait aller jusqu'à quarante ou cinquante pieds par seconde.

De temps en temps, on a proposé divers modes d'éclairage des exploitations par l'électricité ; mais quoique certaines mines se

prêtent à des procédés de ce genre, comme, peut-être, l'exploitation des couches épaisses de charbon dans le Staffordshire, on peut affirmer, sans vouloir faire tort au mérite de leurs auteurs, que de semblables méthodes d'éclairage sont, en règle générale, inapplicables à des houillères étendues.

Météorologie des Mines.

Dans beaucoup de cas on a poursuivi, dans un but exclusivement scientifique, des observations souterraines concernant la température et la pression barométrique; maintenant elles figurent dans le travail journalier de beaucoup de nos grandes houillères, à titre d'indices de la marche de la ventilation sur laquelle la santé et la sûreté des hommes reposent. En vue de cet objet, un baromètre à mercure solide et simple est ordinairement placé dans une cabine située soit près du fond du puits, où l'on est sûr que l'inspecteur le regarde souvent, soit quelquefois près du foyer de ventilation. M. J. T. Woodhouse a commencé il y a environ un quart de siècle, à rendre obligatoire l'usage d'un baromètre placé dans ce dernier endroit, en y substituant à la légende ordinaire *beau temps*, *pluie*, *tempête*, les mots : *feu modéré*, *feu lent*, *feu actif*, destinés à guider les chauffeurs.

Plusieurs personnes d'un esprit observateur ont signalé en diverses occasions la connexion qui existe entre le temps qui règne au dehors et la condition de l'air dans les mines; et il ne peut y avoir aucun doute sur quelques conséquences de la plus grave portée, par exemple : sur ce fait que le dégagement des gaz du front de taille, et aussi d'un coup de mine, est plus abondant quand la pression atmosphérique est moindre; que lorsque la température extérieure s'élève, le courant de la ventilation se ralentit; et que, lorsque la baisse du baromètre et l'élévation de température ont lieu simultanément, comme cela est si souvent le cas, la mine se trouve exposée à un danger plus grand, et en même temps ne bénéficie plus que d'une ventilation amoindrie. Mais c'est seulement depuis le mémoire présenté en 1855 par M. T. Dobson,

à l'Association britannique réunie à Glasgow, que l'on a connu exactement la relation qui existe entre les orages atmosphériques et les explosions. Plus récemment, en 1872, MM. R. Scott, F.R.S., et W. Galloway* ont constaté, entre les explosions survenues dans les houillères en 1868, 1869 et 1870 et les conditions atmosphériques enregistrées à Stonyhurst, une série si remarquable de coïncidences, qu'ils considèrent comme démontré "que les changements météorologiques sont la cause immédiate de la grande majorité des accidents."

Les instruments météorologiques ne devraient pas cependant être tenus seulement dans un local souterrain, mais il faudrait en installer également à la surface, dans quelque endroit des bureaux où ils seraient bien visibles. Et comme, indépendamment des différences dues à l'altitude, des variations soudaines de l'écart existant entre les lectures des instruments d'en haut, et les lectures de ceux d'en bas, peuvent être l'indice de circonstances qui exigent une attention urgente, un appareil qui permettrait de comparer les deux séries rendrait d'utiles services. Ainsi une élévation de température au delà d'une certaine limite indiquerait l'imminence d'une combustion spontanée, et une baisse anormale de la pression barométrique, règnant dans la principale galerie de retour d'air, ferait supposer qu'une obstruction a eu lieu dans le réseau desservi par la ventilation. M. Alan Bagot a fait bréveter récemment une variété de baromètre anéroïde et un thermomètre métallique sans mercure, qui remplissent les conditions voulues en faisant, à l'aide d'une batterie électrique, retentir un signal, dès que les index de ces instruments atteignent certaines limites de dépression ou de température.

Quoique des raisons pratiques soient défavorables à son introduction dans les mines, l'ingénieux appareil de M. Ansell, qui signale la présence du grisou même en petites quantités, mérite de fixer l'attention comme appareil scientifique.

* Sur la relation qui existe entre les explosions dans les houillères et le temps. Proc. Royal Society, 1872, p. 292.

Parmi les autres instruments susceptibles de jouer un rôle dans les mines, il faut citer les thermomètres destinés à prendre la température de la roche ou de l'eau. S'il s'agit de la roche, il n'y a guère d'observations à faire au sujet du thermomètre, si ce n'est qu'il doit avoir une longueur suffisante, être divisé avec exactitude, et rester plongé durant un temps assez long dans un trou préparé un jour ou deux à l'avance; mais si l'on aborde l'idée plus discutable de déduire la température de la roche d'observations faites sur des puits ou des trous de sonde remplis d'eau, la nature de l'instrument à employer mérite d'être examinée de très près.

Parmi les résultats les plus importants acquis à cet égard dans ces dernières années, il faut mentionner ceux que M. Walferdin a obtenus au sondage de Mouille-longe près du Creusot, et ceux du sondage sans rival exécuté par le gouvernement prussien à Sperenberg près de Berlin. Dans le premier de ces sondages on a employé le thermomètre à maximum de M. Walferdin, tel qu'il est décrit dans le Traité de physique de M. Pouillet, Paris, 1856; mais il ne paraît pas que les observations aient été poussées jusqu'à l'extrême profondeur du trou. Celles de Sperenberg ont été faites avec des thermomètres dont le principe avait été proposé par Magnus, et qui ont été construits par Apel, à Göttingue. Malgré toutes les précautions, les résultats présentent des anomalies curieuses, et quand nous trouvons finalement une température de 118·6° Fahr., à la profondeur de 4042 pieds, et que nous songeons aux courants ascendants et descendants qui s'établissent dans la colonne d'eau, nous ne pouvons nous étonner que d'une chose, c'est que l'on ait pu obtenir une échelle d'accroissement de chaleur si voisine de la régularité parfaite.

Appareils électriques pour faire partir les Coups de Mine.

L'usage de l'électricité est encore une chose assez rare dans la pratique des coups de mine quand ils sont du domaine civil,

quoiqu'il y ait sans doute bien des cas où une méthode sûre de mettre le feu serait désirable, surtout si les mines sont nombreuses et fortement chargées. La batterie galvanique, le disque électrique en ébonite, et la machine magnéto-électrique, ainsi que les diverses fusées qui font partir les coups, forment une série d'objets très-intéressants pour l'étude ; mais il en sera probablement question avec assez de détails à la rubrique des appareils militaires.

Ventilation des Mines.

Les machines et appareils qui servent à effectuer la ventilation ne rentrent guère dans le champ de la présente Exposition, mais plusieurs instruments qui servent à éprouver la condition dans laquelle elle a lieu, ou à mesurer le volume réel d'air en circulation, constituent un groupe intéressant pour l'étude et la comparaison.

Il y a des années on examinait la bouffée de fumée provenant d'une parcelle de poudre, ou d'une pipe de tabac, tandis qu'elle flottait le long d'une galerie de niveau dont la longueur était mesurée, puis, en multipliant la vitesse ainsi déterminée par l'aire de la section moyenne du passage, on calculait la quantité d'air qui passait dans un temps donné. M. Biram, des houillères du comté de Fitzwilliam, paraît avoir été le premier à imaginer un anémomètre approprié aux mines. Dans son instrument, un certain nombre d'ailettes faites d'une manière légère, et formant des segments héliçoïdaux, sont fixées à un axe horizontal de telle sorte que, si on les présente latéralement au courant d'air, l'axe fait un certain nombre de tours pour un volume donné d'air qui traverse l'appareil. Ainsi, le pas de l'hélice étant censé de 2 pieds, l'appareil fera une révolution dans le temps que l'air mettra à parcourir un espace de 2 pieds en le traversant. Les nombres de révolutions, ou les longueurs correspondantes parcourues par l'air, sont enregistrés par des compteurs qui offrent une série de cadrans, en sorte que les plus grands instruments, qui ont 12 pouces de diamètre, et les petits, plus récents, qui ont 6, 4, et jusqu'à 2 pouces de diamètre, peuvent accuser

automatiquement jusqu'à 10,000,000 pieds. Un grand nombre de ces instruments ont été fabriqués par MM. Davis et fils, de Derby ; ceux qui sont destiné à de courtes expériences ne peuvent enregistrer que de petits nombres ; mais ceux qui ont plusieurs cadrans peuvent noter les révolutions pendant des heures et des jours consécutifs, et sont préalablement éprouvés par les fabricants à différentes vitesses et munis d'une table pour corriger les erreurs.

L'anémomètre de Casella et Lowne est un instrument petit et délicat basé sur un principe semblable ; ses ailettes sont d'aluminium et il n'a qu'un seul grand cadran indicateur. Un très-faible souffle d'air se fait sentir sur les légères ailes de ce moulin à vent en miniature, qui peut, par conséquent, être employé avec avantage à vérifier la ventilation des hôpitaux et autres bâtiments publics.

Feu le professeur John Phillips, d'Oxford, a proposé, il y a bien des années, l'emploi d'une ailette unique, qui, suspendue en travers du trajet du courant d'air, indique la force comparative de celui-ci par sa déviation de la verticale. M. Dickinson, inspecteur des mines dans le Lancashire, a amélioré cet instrument en le munissant d'un niveau, d'un contrepoids et d'un limbe gradué sur lequel on peut lire, pour chaque angle dont l'ailette est déviée par le courant d'air, la vitesse de ce courant exprimée en pieds par minute.

Le professeur Combes, de Paris, a inventé un anémomètre à ailettes dont il serait intéressant de comparer l'action avec celle du nôtre. Il est décrit dans son "Traité de l'Exploitation des Mines," et on assure qu'on est satisfait de son emploi dans beaucoup de houillères en France. L'anémomètre du Dr. Robinson n'a pas été à notre connaissance employé dans les travaux souterrains, mais le "vélocimètre électrique," dernièrement brévetè par M. F. Pastorelli, est basé sur le même principe quant à la relation entre le nombre des révolutions et la vitesse du vent. Seulement, au lieu de se contenter de l'enregistrement

par des cadrans indicateurs attachés à l'instrument, l'inventeur transmet les indications à distance, dans les bureaux, si on le juge à propos, et cela permet au directeur de voir en tout temps avec quelle vitesse la ventilation se fait dans sa mine. Chaque révolution des ailettes, en forme de coupe, occasionne dans ce système la fermeture d'un circuit électrique, et l'instrument récepteur, qui contient un électro-aimant, porte sur sa face des cadrans dont les aiguilles peuvent enregistrer de 10 à 10,000,000 pieds. Une batterie Leclanché de six éléments n° 2 est reliée à l'instrument quand on veut faire marcher celui-ci, mais on peut, en agissant sur un simple arrêt, en interrompre le courant.

Un plus petit instrument, appelé le nouveau compteur portatif à air, a été aussi construit par Pastorelli sur le même principe que l'anémomètre de Robinson à ailettes en coupe. Il faudra des expériences répétées et soignées pour savoir jusqu'à quel point ce petit anémomètre si maniable pourra se montrer le rival des autres variétés qui l'ont devancé, et, à un point de vue plus général, pour voir lequel d'entre eux, malgré la cause d'erreur introduite par le frottement de l'air contre les parois des passages qu'il traverse, indique avec le plus d'approximation la véritable vitesse moyenne de l'air.

Un instrument très-simple et qui rend des services quand ses indications sont bien comprises, et qu'on y prend garde, c'est le manomètre à eau. On lui donne ordinairement la forme d'un simple tube en U contenant de l'eau colorée. Une des branches communique avec l'air pur, ou courant d'entrée, qui règne d'un côté d'une porte ou d'une cloison, l'autre branche avec l'air impur, ou courant de retour, qui règne de l'autre. La pression est plus grande du côté de l'entrée d'air que du côté du retour; il en résulte entre les surfaces de l'eau dans les deux branches une différence de niveau qu'on mesure par une échelle graduée en pouces et fractions de pouce; on peut déplacer cette échelle verticalement soit à la main soit à l'aide d'une vis. Ce n'est pas comme moyen de mesurer la ventilation, mais comme indication

des résistances causées par le frottement, que cet instrument a de la valeur. Tant que les chemins parcourus par l'air entre les deux points dont on compare la pression sont dans de bonnes conditions, tout accroissement dans l'écart de pression accusé par le manomètre équivaudra à un accroissement de la ventilation, mais si une obstruction a lieu, par exemple par suite d'un affaissement du toit, l'augmentation de l'écart indiquera que le frottement s'est accru quelque part dans les parcours d'air, et par suite provoquera un redoublement de cette vigilance qui dans les houillères sujettes au grisou ne doit jamais se ralentir.

W. W. Smyth.

CRISTALLOGRAPHIE ET MINÉRALOGIE.

L'HISTOIRE de la cristallographie, comme celle de beaucoup d'autres sciences inductives, n'a commencé qu'il y a un siècle. C'est le récit du développement graduel mais vigoureux d'une science qui a partagé avec l'astronomie le privilége d'avoir expliqué un grand nombre de phénomènes naturels, en les déduisant d'une simple loi géométrique. On peut en effet prédire les diverses formes polyèdriques que peut affecter un cristal, lorsqu'on connaît les rapports qui relient quatre plans tautozonaux, de la même manière que les lois de la gravitation permettent de prédire le mouvement des corps célestes. Il suffira d'indiquer ici quels ont été les points principaux par lesquels ont passé les progrès de cette science, ainsi que les principes physiques et morphologiques qui sont à sa base, et cela dans le but de montrer comment on a été conduit à exiger des instruments de plus en plus parfaits pour les recherches cristallographiques.

Nous trouvons déjà dans Pline un essai de description de deux minéraux ; l'un nommé par lui *cristallus* (quartz), l'autre *adamas;* mais cet essai est si imparfait que nous ne pouvons savoir, à l'heure qu'il est, à quel minerai il fait allusion dans l'une au moins de ses descriptions. Au 16me siècle Gessner essaya d'attacher de l'importance aux inclinaisons mutuelles des faces des cristaux, et La Hire au commencement du 17me prit la mesure de quelques uns d'entre eux ; mais le vrai père de la cristallographie fut Romé de Lisle. Le premier, il fit un usage constant et rationnel du

goniomètre de contact, instrument construit pour lui par Carangeot, et son illustre compétiteur et successeur Haüy accumula au moyen du même instrument les faits sur lesquels allait se fonder la science de la cristallographie.

Le nom même de cette science avait été adopté par Romé de Lisle (qui l'avait probablement emprunté à un ancien ouvrage de Capeller) ; son *Essai de Cristallographie* parut il y a cent-quatre ans. Cet ouvrage prit dans une édition subséquente (1783) une forme réellement scientifique, et fut enrichi des mesures d'un grand nombre de cristaux, mesures dont l'auteur déduisit la constance de la valeur des angles de certains cristaux de forme simple.

Ce fut Haüy qui, le premier, chercha à établir un lien entre les groupements plus ou moins compliqués que peuvent offrir les faces des cristaux. Il montra que la relation qui existe entre elles est toute géométrique, et divisa en conséquence les cristaux en différents groupes, en même temps qu'il insistait sur l'importance du clivage et de quelques autres propriétés physiques. En publiant son *Traité de Minéralogie*, il plaça la cristallographie au rang des sciences, en même temps que par son moyen il transformait la minéralogie. Son élève Weiss rejetant l'hypothèse des molécules, par laquelle Haüy avait compliqué l'explication de la forme géométrique des cristaux, chercha à résoudre les problèmes de la cristallographie en partant d'un point de vue plus abstrait. Il donna une nouvelle base à la science par son idée originale, quoique incomplète, de l'importance de la symétrie des faces des cristaux par rapport à certains axes. Il déduisit les systèmes cristallographiques de son principe, et imagina une notation des faces des cristaux plus simple et plus facilement intelligible que celle de Haüy.

Dans cette notation (1816) nous voyons pour la première fois les faces d'un cristal rapportées, non plus aux arêtes externes, mais à certains *axes* imaginaires, parallèles à quelques-unes de ces arêtes et placés à l'intérieur même du cristal. Chaque face du

cristal vient couper les axes à des distances connues, qui constituent ce qu'on nomme les paramètres de ces faces selon chaque axe. De *simples coefficients* placés devant les longueurs d'axes donnent la valeur de ces paramètres, c'est-à-dire la distance à laquelle chaque face prolongée viendrait couper l'un ou l'autre des axes. En déterminant la valeur des nombres représentant ces coefficients pour chaque face, il établit la loi fondamentale sur une base purement géométrique. A la même époque, la chimie arrivait à une loi analogue en déterminant la loi des *proportions multiples*. En même temps et d'après l'axiome *Natura nihil fit per saltum*, on expliquait ces résultats au moyen de la théorie atomique, ou plus exactement de la théorie moléculaire dans le cas de la cristallographie.

Les progrès de la géométrie cristallographique, avec Weiss et le grand minéralogiste Mohs, rendirent nécessaire un nouvel instrument capable de déterminer les angles des cristaux avec plus d'approximation. Cet instrument fut le goniomètre par réflexion imaginé par Wollaston, instrument qui a été souvent et profondément modifié, mais dont le principe est encore employé dans tous les goniomètres actuels. Le goniomètre de Wollaston consiste en un cercle gradué donnant les minutes de degré à l'aide d'un vernier. Ce cercle est traversé en son centre par deux axes concentriques, mobiles l'un par rapport à l'autre, et pouvant être déplacés chacun indépendamment de l'autre. Le cercle est fixé à l'un de ces axes, l'extérieur, et se meut avec lui. Dans l'instrument primitif le cercle se mouvait dans un plan vertical, dans l'instrument de M. le professeur W. H. Miller ce plan est au contraire horizontal. Quel que soit, du reste, le système adopté, le cristal est toujours fixé à l'extrémité de l'axe intérieur, celui qui est indépendant du cercle. Quant à la manière de l'y fixer et de l'y ajuster, elle est susceptible de beaucoup de modifications. La mesure de l'angle solide formé par deux faces d'un cristal se fait, en faisant coïncider pour l'œil de l'observateur, deux signaux : l'un brillant (de préférence un rayon de lumière solaire dirigé par un

héliostat), l'autre relativement sombre. Le premier signal est vu par réflexion successivement sur chacune des faces formant l'angle à mesurer, tandis que le second est vu par vision directe. Il faut en outre que les deux signaux soient dans une plan perpendiculaire à la fois à l'axe de l'instrument, et à l'arête de l'angle qu'il s'agit de mesurer. Enfin l'arête doit être placée de manière à se trouver dans la direction de l'axe, et autant que possible dans son prolongement.

Les modifications que l'on a fait subir à cet instrument peuvent se classer sous les chefs suivants. Celles destinées à :

1° Faciliter la disposition des signaux, par l'emploi de collimateurs, par exemple.

2° Fixer la position de l'œil tout en supprimant le deuxième signal, soit par une lunette munie d'un réticule de fils croisés, soit par une lunette augmentée d'une lentille de manière à la transformer en un microscope de faible grossissement.

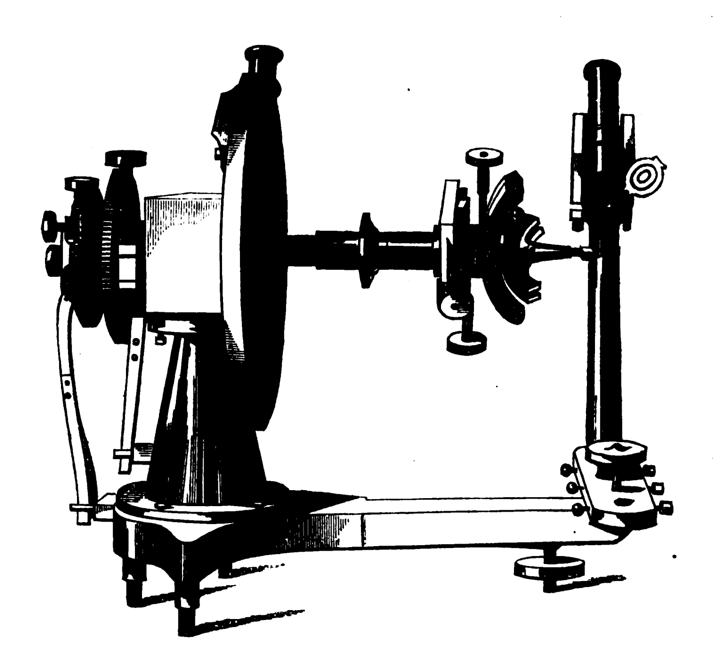
3° Faciliter l'arrangement et l'ajustement du cristal sur son axe.

4° Enfin, introduire tous les perfectionnements que les progrès de la mécanique ont permis d'apporter à l'ajustement, l'emboîtement et la régularité de toutes les pièces de l'instrument.

Le goniomètre de Mitscherlich tel qu'il existe maintenant, avec ses perfectionnements modernes, peut être regardé comme le type des instruments à un seul signal, observé par un télescope avec l'adjonction d'un collimateur, si le signal n'est pas suffisamment éloigné ; peu importe, du reste, que le cercle soit horizontal ou vertical. On ajuste le cristal au moyen de deux supports mus par des vis qui lui donnent deux mouvements perpendiculaires entre eux et à l'axe de l'instrument. Deux autres mouvements peuvent lui être communiqués par deux supports en arcs de

cercles concentriques, se mouvant tous deux dans le plan de l'axe, mais chacun dans un plan perpendiculaire à celui de l'autre. Ces deux derniers supports sont mis en mouvement par des vis tangentes, engrenant avec la surface dentée du support lui-même. L'arête du cristal doit se trouver à peu près au centre de ces arcs de cercle.

Les deux derniers mouvements servent à placer l'arête du



cristal parallèlement à l'axe de l'instrument, tandis que les premiers permettent de faire coïncider cette arête avec la direction elle-même de cet axe.

Cette forme de construction, récemment adoptée par Fuess à Berlin pour ses excellents instruments, fut imaginée par le docteur V. von Lang lorsqu'il était au British Museum, comme un perfectionnement de ce qui existait alors. C'est au même cristal-

lographe que l'on doit la méthode d'ajuster les positions relatives de la lunette et du cristal dans la direction de l'axe en faisant mouvoir, non pas la lunette, mais le cristal. À cet effet les parties de l'appareil qui servent à le fixer viennent glisser et s'emboîter sur un cylindre d'acier convenablement tourné, qui forme le prolongement de l'axe du goniomètre. Cet instrument est en outre muni de pièces, permettant d'obtenir le parallélisme parfait entre le plan contenant l'axe du télescope et la mire, et celui du disque gradué, ainsi que pour corriger les erreurs provenant d'autres circonstances. Ces perfectionnements rendent, sans doute, l'instrument plus ou moins compliqué dans son usage, mais une fois ajusté, ce goniomètre a toutes les qualités des appareils délicats de l'astronomie.

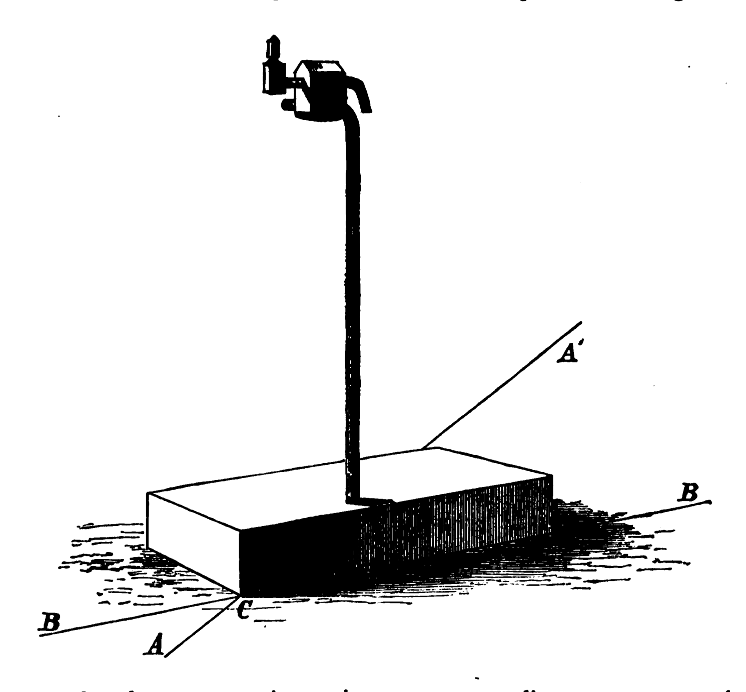
En y ajoutant quelques pièces, le goniomètre ainsi modifié peut devenir un excellent instrument pour déterminer les indices de réfraction, ou mesurer les angles que font entre eux les axes optiques des cristaux à deux axes.

Les faits nombreux ajoutés par Mitscherlich à la connaissance de l'isomorphisme, ainsi que les modifications des angles des cristaux dues à une variation de température, n'ont pu être reconnus qu'à l'aide d'un instrument muni de tous les perfectionnements que nous venons d'indiquer.

D'un autre côté, le professeur W. H. Miller a conservé la méthode de Wollaston, mais il a modifié l'instrument en rendant le disque horizontal et de dimensions suffisantes pour lire un angle de 15'. Il a apporté quelques perfectionnements, aussi simples qu'excellents, à l'ajustage et au centrage du cristal, et ne se sert que de lumière solaire régularisée par l'emploi de collimateurs. Il a obtenu par ces moyens des résultats remarquables, et il a pu montrer que l'œil suffit à mesurer tout cristal, quelque petit qu'il soit, tout en étant néanmoins compris dans les limites de la vision, pourvu que ses faces soient suffisamment réfléchissantes.

Le professeur Miller a également imaginé un instrument très-ingénieux, pouvant remplacer le goniomètre par réflexion et ayant

l'avantage de pouvoir être construit par n'importe qui. Il suffit d'avoir en sa possession un morceau de planche plate et dont les bords soient droits, deux morceaux de liége et deux tubes de verre recourbés à angle droit, à un pouce et demi de leur extrémité. La figure montre la disposition de l'appareil. Les deux tubes traversent l'un des liéges dans des directions perpendiculaires ; l'extrémité du plus long vient se fixer dans la planchette. Quant



au tube plus court, après avoir, comme nous l'avons vu, traversé un des liéges, il vient se fixer dans le second, qui est de dimension moindre. C'est sur ce dernier liége que l'on enfonce l'épingle portant le cristal, ou que l'on fixe directement ce dernier par un peu de cire.

On se procure ensuite deux mires dans le même plan horizontal que le cristal, l'une destinée à être vue directement, l'autre par

réflexion ; le cristal lui-même est placé à la manière ordinaire, son arête étant perpendiculaire à ce plan. Le cristal ajusté, on fait coïncider les mires sur la première face de l'angle à mesurer comme d'habitude. On a eu soin préalablement de placer sous la planchette une feuille de papier blanc que l'on fixe par des épingles. Une fois la coïncidence obtenue sur la première face, on trace le long du côté de la planchette et sur le papier une ligne droite A A'. Puis en déplaçant tout l'appareil, mais faisant en sorte que le cristal reste autant que possible au même point de l'espace, on établit la coïncidence des mires sur la seconde face. On trace le long de la planchette une seconde ligne B B' obtenue comme A A' et coupant A A' en C. L'angle A C B que l'on obtient ainsi est celui des normales aux faces du cristal ; on peut facilement en prendre la valeur avec un compas.

Il suffit pour cela de tracer un cercle ayant pour centre le sommet de l'angle, et de comparer l'arc intercepté par les côtés de l'angle avec la circonférence entière, les arcs égaux étant mesurés par leurs cordes ; on trouve une mesure commune approximative des arcs en divisant chaque différence successive par la suivante, et en déterminant ainsi par une fraction continue le rapport des arcs. L'angle des faces est la moitié de A C B.

C'est à F. E. Neumann (1823) que la cristallographie doit d'avoir remplacé l'appréciation géométrique complexe du nombre des faces formant un polyèdre par *les pôles* de ces faces, c'est-à-dire par les points où des rayons normaux à ces faces et appartenant à une sphère dont le centre se trouverait placé dans l'intérieur du cristal, viendraient couper ces faces. Lévy et Weiss avaient déjà reconnu l'existence de zones de plans ayant leurs arêtes parallèles. On put ainsi remplacer les zones de plans par des grands cercles de la sphère de Neumann, le long desquels se trouvaient placés les pôles des différents plans appartenant à une même zone. Les travaux de Grassmann et du grand crystallographe anglais V. H. Miller, professeur de minéralogie à Cambridge, montrèrent l'importance et le nombre des conséquences

que l'on pouvait déduire de ce principe. Parmi ces conséquences nous pouvons signaler une notation plus intelligible, plus simple, et à la fois plus complète de chaque face d'un cristal. La notation de Neumann n'en faisait connaître que la forme et souvent non sans peine. On put ainsi appliquer aux problèmes de la cristallographie toutes les formules de la trigonométrie sphérique, et par suite établir les relations des plans en zones et des zones entre elles, en donnant une nouvelle forme à la loi fondamentale de la cristallographie, et en montrant qu'elle n'est au fond qu'une fonction rationnelle de quatre plans placés dans une zone. Grailich établit la permanence des zones, et par conséquent le type de symétrie d'un cristal, quelles que soient les variations de température.

Bravais, en considérant un cristal comme un réseau de molécules ayant leurs centres de masse placés à égale distance le long de directions parallèles et symétriques, en déduisit *a priori* les formes symétriques que peut présenter un même système cristallin et par conséquent la nécessité de la loi fondamentale. Karsten obtint la même loi en partant de ses recherches géométriques sur la cohésion, tandis que Victor von Lang et Axel Gadolin arrivaient chacun de leur côté à des résultats conformes à ceux de Bravais, sans faire aucune hypothèse moléculaire; leurs démonstrations manquent, il est vrai, un peu de rigueur et de simplicité. On peut donc considérer maintenant les lois de symétrie réglant les formes des cristaux, et obtenues d'abord par les savants au moyen d'observations répétées, comme n'étant au fond que les conséquences d'une seule loi fondamentale.

En même temps que la cristallographie géométrique s'approchait ainsi de son but, les cristallographes s'apercevaient de plus en plus qu'un cristal n'est pas seulement un polyèdre géométrique, mais qu'en définitive sa forme résulte de l'action combinée des lois de la physique et de la chimie sur la matière qui le compose. Il est inutile de rappeler ici tout ce que l'optique doit à l'emploi des cristaux, depuis Huyghens jusqu'à Fresnel. L'extension des

faits observés par ces savants dans le quartz ou le spath d'Islande à toutes les autres substances cristallisées devint l'affaire des cristallographes, qui durent employer pour cela leurs instruments et leurs méthodes d'observation les plus délicates. Les magnifiques expériences de Brewster et de Biot au commencement de ce siècle avaient déjà montré qu'il existe des relations entre les propriétés optiques des cristaux et leur forme cristalline, et en particulier que les cristaux produisant la réfraction simple, ou la réfraction double à un axe ou à deux axes, appartiennent à des systèmes cristallographiques différents. Les observations de sir J. Herschel et de Neumann ont montré que la dispersion des axes optiques (pour différentes longueurs d'onde) n'est symétrique d'aucun axe, sauf le cas où la ligne moyenne coïncide avec un axe morphologique du cristal.

Les admirables recherches de Grailich et Von Lang à Vienne, de Des Cloizeaux à Paris, ont montré que les variations dans cette dispersion des axes sont susceptibles d'applications importantes à la cristallographie. On a réussi à leur aide à corriger nombre d'erreurs dans lesquelles étaient tombés les cristallographes et en particulier à faire passer certains cristaux d'un système dans un autre.

Il est facile de comprendre que ces expériences de cristallographie physique, et spécialement optique, ont nécessité la création d'instruments capables d'en exécuter les recherches avec une grande précision. On peut classer sous les chefs suivants les services que ces instruments doivent pouvoir rendre :

1° Détermination des caractères optiques des cristaux (savoir s'ils sont à un ou à deux axes, positifs ou négatifs).

2° Détermination dans ces mêmes cristaux des sections principales et des axes optiques.

3° Caractères de la dispersion des axes pour les différentes couleurs.

4° Détermination des indices de réfraction, et par conséquent de l'élasticité optique du cristal le long de ses principaux axes.

Lorsque le cristal ne fournit pas par lui-même les faces requises, il s'agit d'abord de le tailler convenablement. Une petite scie, une lime ordinaire, des pierres à aiguiser et des cuirs dont la surface est plus ou moins lisse, suffisent en général pour tailler les cristaux produits dans les laboratoires, ainsi qu'une partie des cristaux naturels. Mais pour d'autres cristaux plus résistants il faut se servir des outils du lapidaire. Ces outils se composent de disques de fer doux ou d'acier, recouverts d'émeri et de poudre de diamant, destinés à opérer des sections dans le cristal, ainsi que de roues d'étain couvertes d'émeri fin et de poussière de diamant. Pour transformer les sections opérées en surfaces planes il faut un assortiment de plateaux de divers métaux, dont un en général de bronze recouvert de poudre d'émeri la plus fine. C'est sur ces plateaux et à l'aide de pierres spéciales (de "Water of Ayr," du Levant, du Kansas), que l'on achève l'ouvrage et que l'on polit les surfaces. Toutefois la matière qui sert à polir et à terminer les surfaces varie avec la dureté et la contexture du cristal, et ce n'est que l'expérience qui peut indiquer la manière de s'y prendre. Indiquons aussi la friction de la main sous un courant d'eau comme une des meilleures manières d'arriver à un poli parfait, quand la substance n'est pas trop dure, et dans le cas d'une coupe de roche, d'obtenir une surface parfaitement propre.

Ainsi en possession d'un cristal convenablement préparé, nous pouvons examiner quels sont les principaux instruments qui peuvent nous servir. Historiquement, nous aurions à commencer par les polariscopes de Biot et de Brewster (1813—1830) ou par l'instrument de Nörremberg, celui de Dove, d'Amici, ou de Soleil ; nous pourrions passer en revue toutes les variétés de ces instruments, depuis la simple pince à tourmalines, jusqu'au microscope polarisant de Nörremberg et à celui d'Amici, habilement modifié par Des Cloizeaux. Nous nous contenterons d'examiner les plus parfaits de ces instruments.

Le stauroscope de Kobell sert à déterminer les sections optiques principales sur les différentes faces d'un cristal, ainsi qu'à recon-

naître à quel système appartient un cristal. Le principe de cet instrument est fondé sur la torsion produite dans l'image stauroscopique d'une lame de spath d'Islande taillée perpendiculairement à l'axe (vue dans de la lumière un peu convergente entre deux tourmalines ou deux Nicols croisés), lorsqu'un cristal transparent est placé sur le trajet des rayons lumineux, de façon que ses sections principales ne coïncident pas en direction avec les axes des tourmalines (ou les sections principales des Nicols). On peut faire tourner le cristal jusqu'à ce que cette coïncidence s'établisse, et mesurer ainsi l'angle dont sont inclinées les sections principales sur une arête ou toute autre direction cristallographique, déterminée d'avance, et placée dans la ligne 0°—180° d'un cercle gradué se mouvant avec le cristal. Brézina a donné à cet instrument une forme plus convenable, et a réussi en outre à en augmenter la sensibilité, en remplaçant la lame de spath d'Islande par une autre, formée de deux lamelles ayant chacune son axe optique légèrement incliné sur la normale à la lame. C'est à Grailich que l'on doit la théorie complète de cet instrument. Comme on y fait usage de lumière à peu près parallèle, on ne peut pas l'employer directement à une détermination importante, celle des sections principales de cristaux tels qu'ils se présentent dans la coupe d'une roche sous le microscope. Quoique ces recherches microscopiques ne puissent ordinairement donner que des résultats approximatifs, elles ont cependant une grande importance. Pour y arriver, on peut adapter au microscope un goniomètre oculaire, dans lequel un fil placé au foyer de la première lentille tourne autour du centre du champ, tandis qu'un second a été fixé parallèlement à la trace du plan dans lequel est polarisée la lumière. On peut déterminer exactement cette position en faisant coïncider pour l'œil le fil avec l'arête d'un petit cristal de mésotype, ou d'un minéral orthorhombique à prisme allongé. Le petit prisme est fixé sur une lame de verre, et mu par le mouvement du porte-objet du microscope dans une position telle qu'il ne soit pas coloré lorsque les Nicols sont croisés, ou que l'analyseur est légèrement

tourné à droite ou à gauche de cette position. Supposons maintenant que l'on connaisse une ligne de direction cristallographique dans un cristal transparent faisant partie d'une coupe de roche, il est facile de substituer ce cristal au petit cristal de mésotype employé précédemment, et de faire coïncider la ligne connue avec le fil fixé à l'oculaire. Si le rayon de lumière se trouve dépolarisé par l'introduction du cristal soumis à l'expérience, on aura la preuve que la ligne connue doit faire un angle avec les sections principales, puisque dans ce cas aucune de ces sections ne coïncide avec le plan primitif de polarisation. En faisant tourner ensuite le cristal lui-même, il est facile de l'amener au point où il y a le moins de lumière transmise. Faisant alors tourner l'oculaire, on fait coïncider, ou tout au moins on place parallèlement pour l'œil le fil avec l'arête, ou la direction connue dans le cristal, et l'on mesure le déplacement angulaire nécessaire pour produire ce résultat. On obtient ainsi l'angle des sections principales de la coupe du cristal considéré avec la direction cristallographique supposée connue.

Les applications de cette méthode sont plus limitées que celle du stauroscope. Pratiquement leur principal intérêt est de servir à la détermination du système cristallin auquel appartient un minéral, quand celui-ci se trouve être du petit nombre de ceux dont les caractères cristallographiques et optiques sont familiers au minéralogiste.*

Les microscopes polarisants perfectionnés de Nörremberg et de Des Cloizeaux sont excellents pour remplir les desiderata mentionnés ci-dessus sous les nos 1 et 3. Ce qu'on cherche surtout à obtenir à l'aide de ces instruments, c'est que les rayons ordinaires et extraordinaires de lumière polarisée rectilignement qui traversent le cristal, en général très-petit, soient écartés le plus

* C'est ainsi que l'auteur de ces lignes a pu, en mesurant les inclinaisons des arêtes des sections, et en connaissant la direction des plans de clivage par rapport à ces mêmes arêtes, déterminer dans des météorites la présence d'un autre minéral prismatique que l'Olivine, à savoir l'Enstatite (ou Bronzite) avant que l'analyse chimique en eût reconnu la présence.

possible l'un de l'autre, et qu'en outre le champ de l'instrument soit le plus grand possible. Dans l'appareil français, la lumière est polarisée par réflexion ; dans celui de Nörremberg, la lumière est disposée de manière à converger vers le centre d'un Nicol. Dans ce dernier on place le cristal sur un support disposé de manière que la lumière est forcée auparavant de passer par une série de lentilles placées symétriquement par rapport à la section du cristal, et qui obligent le rayon de lumière polarisée à traverser le cristal sous tous les angles possibles. À leur sortie du cristal, les rayons passent au travers de nouvelles lentilles qui permettent l'examen des anneaux colorés au moyen d'une dernière lentille d'un faible pouvoir grossissant ; au dessus de cette dernière lentille est enfin placé l'analyseur. On peut en outre placer entre la lentille et le Nicol une lame d'un quart d'onde, ou un quartz coupé perpendiculairement à l'axe, lorsqu'il s'agit de déterminer si le cristal est positif ou négatif.

Les additions que l'on a faites au microscope polarisant tendent à le transformer en stauroscope ; les lentilles sont disposées de manière à n'admettre que les rayons centraux et à peu près parallèles ; ou encore, lorsque l'angle de divergence n'est pas trop considérable, un petit disque gradué comme dans l'instrument de Soleil permet de mesurer l'angle des axes optiques. Dans ce dernier but il est préférable cependant d'employer un instrument *ad hoc*, comme le goniomètre de Babinet, ou l'instrument perfectionné construit par V. von Lang, et qui ne laisse rien à désirer. Nous ne pouvons donner ici les méthodes employées pour déterminer la dispersion des axes optiques au moyen du microscope polarisant ; quant aux instruments destinés à mesurer les indices de réfraction, ils appartiennent plutôt à la physique, quoique cependant le cristallographe ait à s'en servir, et que le goniomètre modifié puisse parfaitement les remplacer.

Mentionnons seulement les instruments dans lesquels Haidinger, Groth et d'autres ont cherché à combiner tout ou partie des desiderata de l'optique cristallographique. Le dichroscope de Haidinger

est fort utile pour l'étude des variations de l'absorption des rayons de diverses couleurs, suivant la direction que prennent leurs vibrations quand ils traversent un cristal. Cet instrument a été appliqué à la spectroscopie, mais ce n'est pas ici le lieu d'en parler.

Du reste, on a reconnu que les lois de symétrie qui régissent la forme d'un cristal, et qui existent aussi dans l'action qu'il fait subir à un rayon lumineux, à la chaleur, ou même dans les modifications qu'il subit lui-même sous l'influence d'une variation de température, ne sont pas les seules existantes. Peu à peu on a compris que toutes les forces qui peuvent modifier un cristal, depuis les formes les plus grossières de compression mécanique, jusqu'aux actions les plus faibles et les plus délicates qu'exercent sur lui l'électricité ou le magnétisme, sont toutes soumises à la loi de symétrie. On a reconnu enfin que, de la même manière qu'il existe une symétrie de forme pour un cristal, il en existe une aussi dans des directions correspondantes pour tous ses caractères physiques; c'est-à-dire que la matière du cristal produit et reçoit symétriquement toutes les manifestations d'une force quelconque. On a vu quelques-unes des anomalies les plus remarquables dans la forme des cristaux, comme l'absence, ou la suppression de certaines particularités morphologiques, correspondre à des phénomènes particuliers dans les caractères physiques de ces mêmes cristaux. Citons comme exemple les phénomènes pyro-électriques, ainsi que ceux de la polarisation rotatoire. Pour établir ces nouveaux caractères il faut se servir des appareils les plus perfectionnés, et les observations sont parmi les plus délicates qui existent. Elles exigent des instruments destinés à mesurer les variations des états calorifique, magnétique, ou électrique d'un cristal, sa dureté suivant diverses directions (scléromètres), son pouvoir cohésif, son élasticité mécanique, ainsi que la grandeur et la direction des axes d'élasticité. Il reste encore beaucoup à faire dans ce champ d'expériences, particulièrement en ce qui concerne les caractères mécaniques.

Si nous voulions considérer les instruments qui servent à

d'autres recherches que celles de l'optique cristallographique, comme ceux destinés à déterminer les caractères thermiques, la cohésion, l'élasticité et les propriétés magnétiques et électriques d'un cristal, nous aurions à voir l'emploi d'instruments qui rentrent spécialement dans le domaine de la physique, encore plus que ceux dont nous avons déjà parlé.

Il ne nous reste donc plus qu'à examiner ceux qui sont nécessaires à l'étude de la minéralogie et spécialement à son enseignement.

L'un des caractères fondamentaux d'un minéral, sa composition chimique, est du domaine de la chimie; les méthodes et les instruments de l'analyse chimique inorganique sont employés dans les deux sciences, mais leur description appartient évidemment au chapitre de la chimie. L'importance de la minéralogie pour le mineur a cependant produit des méthodes d'un intérêt pratique considérable, et avantageuses par leur simplicité. Ces méthodes se fondent sur l'emploi du chalumeau et des quelques appareils simples de physique qui l'accompagnent généralement. L'École de Freiberg a longtemps été sans rivale, soit pour fournir ces appareils, soit pour enseigner la manière de s'en servir. Toutefois, grâce à l'hésitation que manifestent les chimistes à appliquer les règles de la cristallographie à leur science, c'est au minéralogiste à étudier et à enseigner ce qu'on pourrait appeler la morphologie chimique; pour le minéralogiste, en effet, cette science est essentielle.

On construit actuellement des modèles remarquablement bien faits des diverses variétés de symétries cristallines ou des formes de cristaux; ils sont en bois tendre et se vendent à un prix très-modique, eu égard au fini avec lequel ils sont travaillés. On doit également posséder, pour un enseignement rationnel, des figures des différentes formes cristallines et des modèles en fil métallique représentant les plans symétriques en cristallographie ou leurs axes. Il serait utile d'avoir aussi, soit des figures, soit des modèles représentant les caractères optiques, ou appartenant à d'autres

chapitres de la physique, des différents systèmes cristallins; par exemple, des modèles donnant la surface de l'onde ou l'ellipsoïde isothermique dans un cristal, ainsi que les diverses variétés de dispersion. Il est inutile d'énumérer ici tout les perfectionnements que le génie du professeur ou les besoins de la salle de cours peuvent suggérer pour ces démonstrations.

Nous devons encore mentionner une des choses les plus utiles pour l'enseignement, c'est l'usage des collections, typiques ou autres, montrant la classification en minéralogie. Des cristaux naturels ou artificiels choisis avec soin, et destinés à illustrer les faits les plus remarquables de la cristallographie, peuvent rendre aussi de grands services. On pourrait également avoir des collections de coupes de cristaux, montrant les variétés de divergence des axes optiques ou leur dispersion; d'autres feraient comprendre l'influence de la chaleur, de la compression sur leur élasticité optique, ou bien montreraient les diverses courbes isothermiques relatives à la conductibilité. Des appareils et des cristaux donnant les phénomènes du polychroïsme, ou montrant les relations qui existent entre les formes des cristaux et leur pyro-électricité ou leur polarisation rotatoire, seraient aussi utiles.

Pour l'étude de la pétrologie, science qui ne peut être comprise que par un minéralogiste accompli, on devrait avoir, soit des collections de coupes des principaux minéraux existant dans les roches et de ces roches elles-mêmes, soit des collections de roches de tous les pays, ou simplement de localités spéciales. Il serait désirable également de pouvoir connaître les meilleurs outils du lapidaire et la manière dont on peut couper, polir et monter des coupes microscopiques. Enfin, pour être complète, une exposition devrait fournir les meilleurs modèles de microscopes, munis d'accessoires permettant l'usage de la lumière polarisée, et d'effectuer certaines mesures, peut-être aussi d'accessoires qui permettraient des observations spectroscopiques.

NEVIL S. MASKELYNE.

APPAREILS EMPLOYÉS EN BIOLOGIE.

Des instruments relativement simples ont été employés pour les recherches biologiques, dès les temps anciens, mais l'emploi d'appareils délicats, et spécialement l'emploi d'instruments de précision pour la mesure quantitative des forces exercées par la matière vivante, est de date comparativement récente. En fait, la conception des problèmes, pour l'investigation desquels de tels appareils étaient nécessaires, restait impossible jusqu'à ce que les sciences physiques et chimiques eussent atteint un haut degré de développement, et fussent prêtes à fournir, non-seulement les principes des méthodes sur lesquelles la physiologie expérimentale est basée, mais encore les instruments à l'aide desquels l'expérimentation doit être exécutée.

Des deux divisions principales de la biologie, savoir la *morphologie* et la *physiologie*, il est évident que la première, étant basée sur l'observation de la forme et de la structure des animaux et des plantes, est par sa nature moins dépendante des autres branches de la science que la physiologie, laquelle n'est en résumé que l'application des lois de la physique et de la chimie à l'explication des phénomènes de la vie.

Ainsi la zoologie et la botanique systématiques, pour autant qu'elles pouvaient reposer sur l'observation des formes extérieures et sur l'inspection superficielle de la structure interne, et même l'anatomie, dans la mesure où elle peut être étudiée à l'œil nu, ont fait de considérables progrès sans autre secours que celui des

instruments les plus simples, tels que couteaux, ciseaux, scies, pinces, aiguilles et crochets.

Vésale a fondé son grand ouvrage sur des recherches faites à l'aide de ces instruments peu compliqués, et ce n'est qu'au 17me siècle que le pouvoir de la vision d'une part, et les moyens d'étudier la structure intime des tissus d'autre part, ont été étendus par les découvertes de l'optique et de la chimie.

Il est vrai que la très-intéressante collection de microscopes anciens et modernes exposée à South Kensington contient un microscope composé, inventé et construit environ l'an 1590 (No. 3,513), mais ce n'est guère autre chose qu'un jouet. Le 17me siècle nous a légué les microscopes de Leuwenhoek (No. 3,512), vénérables reliques de l'époque à laquelle les bases de l'anatomie microscopique ont été posées; tandis que le microscope de Lyonnet (No. 3,525) nous rappelle que le 18me siècle a produit l'un des travaux les plus parfaits de dissection délicate: "Le Traité anatomique de la Chenille qui ronge le bois de Saule."

Entre les mains de Malpighi, Leuwenhoek, Grew, Swammerdam, Lyonnet, Hewson et d'autres, le microscope simple, formé soit d'une seule lentille, soit de deux ou trois lentilles superposées, a produit des merveilles; en même temps les admirables méthodes d'injection de Ruysch, ont surmonté la difficulté en apparence insoluble de suivre par la simple dissection les plus petits vaisseaux et canaux des tissus organisés.

La dissection aidée de la macération, l'étude microscopique poussée aussi loin que le microscope simple pouvait le permettre, et peut-être servie par les formes les plus anciennes et encore bien imparfaites du microscope composé, enfin l'injection à l'aide de la seringue ou de la colonne à mercure, telles ont été les seules méthodes de recherches anatomiques jusqu'aux cinquante dernières années.

Les perfectionnements du microscope composé, au commencement de ce siècle (voir le No. 3,526), par l'invention de méthodes suffisantes pour corriger les aberrations de sphéricité et de chro-

matisme, et pour éclairer les objets, ont permis aux anatomistes d'étendre leurs recherches sur la structure intime des tissus avec un succès inespéré, et d'employer des pouvoirs grossissants de deux et trois mille diamètres avec autant de sûreté que celle qu'on pouvait avoir dans un grossissement quatre fois moindre il y a quarante ans.

De nombreux exemples de microscopes, des meilleures constructions modernes, peuvent se voir dans la collection, et le paragraphe que le président de la Société de Microscopie a bien voulu faire pour ce Guide donnera une description complète des principes qui dirigent les constructeurs de ces admirables instruments.

L'histologie moderne ne pouvait guère avoir existé avant les microscopes modernes, car les détails de la structure animale et végétale n'apparaissent que sous les pouvoirs amplifiants considérables et la définition parfaite des instruments actuels ; mais la forme à la fois précise et déterminée que nos notions sur la structure et le développement a acquise pendant les dix ou quinze dernières années est due surtout au fait que l'anatomiste a été aidé par le chimiste. Celui-ci lui a fourni des corps tels que l'acide chromique, l'acide hyperosmique, l'acide picrique, et autres, à l'aide desquels les tissus organiques trop mous sont rendus assez durs pour qu'on puisse les couper en tranches suffisamment minces, sans altération de leur forme et de leur structure essentielle ; sous l'action de quelques-uns de ces agents les différents éléments des tissus prennent des teintes différentes et peuvent être ainsi séparés et distingués les uns des autres.

Ensuite de cela l'on a inventé divers modes de préparer, de teindre, et de couper les tissus organiques, et diverses espèces d'instruments destinés à faire ces coupes. Des méthodes vraiment parfaites de conserver les objets microscopiques les plus délicats ont été inventées, et l'art des injections a été considérablement perfectionné.

Dans certains cas il peut être de grande importance d'étudier

les effets de la chaleur et du froid sur des objets vivants, ou bien de pouvoir suivre le développement du même organisme microscopique pendant un temps souvent considérable et dans des conditions qui empêchent le contact d'autres organismes. De là l'invention de tables chaudes et froides, de chambres humides, d'appareils de développement et de culture dont des spécimens ont été exposés.

Les progrès de l'anthropologie ont exigé la détermination précise de la forme et des dimensions des différentes parties du corps humain. L'on pourra voir dans la collection une série d'appareils servant à cette fin (No. 3,999).

On a exposé des spécimens très-perfectionnés de pièces anatomiques, et spécialement de squelettes, montés de telle manière que les os isolés peuvent être enlevés et examinés sur toutes leurs faces (No. 3,812). Signalons encore quelques exemples très-remarquables de modèles anatomiques et zoologiques, et de diagrammes.

Comme le but de la physiologie est de déterminer les propriétés et les modes d'action de la matière vivante et de les expliquer, pour autant qu'il sont explicables, en les rapportant aux lois de la physique et de la chimie, elle doit s'appuyer sur l'observation et sur l'expérimentation de cette matière vivante pour trouver les bases de ces lois.

Dans des phénomènes d'un caractère aussi compliqué, la simple observation ne peut mener bien loin, et la connaissance que nous avons des vérités les plus importantes de la physiologie a été acquise, ainsi que le démontre l'histoire de la science, par l'expérimentation sur des animaux vivants et des plantes vivantes.

Les anciens physiologistes se contentaient de demander à leurs expériences des résultats qualitatifs. Ils déterminaient la nature mais non la quantité des forces en action dans les tissus. Ils constataient la qualité et le caractère général des sécrétions et des excrétions, mais ils n'arrivaient pas jusqu'à la composition exacte

ou à la quantité précise de la matière sécrétée ou excrétée. Les expériences de Hales ou de Priestley avaient ouvert la voie à la détermination quantitative des procédés physiologiques, mais ce n'est que la génération actuelle qui a pu assister aux progrès immenses que l'emploi des instruments de précision a fait faire dans cette direction à la physiologie.

A ce point de vue, un intérêt particulier s'attache à la balance musculaire (No. 3,808), construite et employée, il y a aujourd'hui quarante ans, par l'éminent anatomiste et physiologiste qui a établi les bases de l'histologie animale. Du Bois Reymond, en parlant des expériences faites à l'aide de cet appareil, a dit qu'elles ont été les premières expériences dans lesquelles une force vivante a été étudiée par les méthodes physiques, les premières expériences qui aient donné des résultats traduisibles par une formule mathématique.

La preuve la plus évidente des progrès de la physiologie depuis 1836 se trouve dans les instruments nombreux et variés destinés à la détermination quantitative de toute espèce de phénomènes fonctionnels que nous offre l'Exposition.

Les relations de l'électricité avec les propriétés des substances musculaires et nerveuses ont permis l'emploi des appareils les plus délicats de l'électricité pour les recherches physiologiques. Ce n'est pas trop de dire que l'introduction des différents appareils enregistreurs a eu pour la physiologie la même importance que l'emploi du microscope pour l'anatomie. On est arrivé à résoudre dans ses temps successifs, une action qui paraissait instantanée, exactement comme le microscope a décomposé dans ses parties constituantes un point qui à l'œil paraissait simple. Les éléments des mouvements coordonnés les plus complexes ont été déterminés isolément, et leurs relations mutuelles définies avec autant de précision que de son côté le microscope peut en mettre à séparer les éléments histologiques d'un tissu composé, mais qui paraît homogène à l'œil nu. Les appareils à l'aide desquels M. Marey a si brillamment analysé les phénomènes de la locomotion animale

sont un excellent exemple de ce genre de recherches physiologiques.

L'application des appareils chimiques et physiques les plus délicats à l'étude d'une fonction telle que la respiration, et à l'explication et à la démonstration du jeu des organes des sens, est bien représentée dans l'exposition actuelle.

La série de modèles, de collections d'échantillons, et d'autres appareils destinés à la démonstration des sciences biologiques dans les écoles est particulièrement digne de l'attention de tous ceux qui s'intéressent à l'éducation. Le plan de l'institut de physiologie végétale à l'université de Breslau (No. 3,852) intéressera particulièrement les visiteurs anglais, car ils ne sauraient connaître dans leur pays aucune institution analogue à lui comparer.

T. H. Huxley.

MICROSCOPES.

Les microscopes peuvent être divisés en deux classes, les microscopes simples et les microscopes composés.

Microscopes simples.

Le microscope simple consiste en une ou plusieurs lentilles arrangées de telle sorte que l'objet est vu directement et qu'il n'y a pas d'image réelle formée par une suite de lentilles et examinée par d'autres lentilles, comme c'est le cas dans le microscope composé.

L'utilité et le pouvoir amplifiant d'une lentille simple, ou d'un microscope simple, consistant en une combinaison de lentilles, dépendent seulement du fait qu'ils rapprochent des rayons provenant d'un objet placé assez près des yeux pour ne pas faire une image distincte sur la rétine, et qu'ils les font entrer à travers la pupille parallèles ou assez peu divergents pour rendre la vision distincte.

Dans la construction et l'usage des lentilles deux grandes difficultés se rencontrent toujours. Il est pratiquement presque impossible de faire de petites lentilles avec des surfaces autres que des courbes sphériques, et par malheur de simples lentilles sphériques ne sont pas capables d'amener les rayons à un foyer exact et parfait. S'il était possible de construire des lentilles avec des surfaces elliptiques ou hyperboliques, ce que l'on appelle l'aberration de sphéricité serait corrigée ; mais même alors, comme

les différents rayons du spectre sont différemment réfrangibles, la longueur focale de la lumière rouge est plus grande que celle de la lumière bleue, et il est impossible d'obtenir une image distincte qui soit exempte de couleurs marginales. En employant des lentilles simples, les deux aberrations de sphéricité et de chromatisme peuvent être réduites à des proportions minimum en diminuant l'ouverture avec un diaphragme, ou en usant seulement de la partie centrale de la lentille ; mais alors ce que l'on gagne en pouvoir de définition, on le perd en éclat.

Pour surmonter ces difficultés on a proposé différentes combinaisons de lentilles à surfaces sphériques, et l'on est arrivé à corriger presque complètement l'aberration de sphéricité. Des lentilles doubles ou triples ainsi combinées, montées ensemble d'une manière convenable, ont l'avantage d'être très-portatives, et comme l'objet est vu dans sa position naturelle, et non pas renversé comme sous le microscope composé, cet instrument est beaucoup plus facilement applicable aux dissections et aux manipulations, tandis qu'avec le microscope composé, chaque mouvement étant renversé, la dissection devient presque impossible. D'un autre côté, si l'on veut employer de grands pouvoirs grossissants, on est obligé de rapprocher tellement l'objet des lentilles, et il est tellement fatigant pour les yeux de regarder à travers l'ouverture nécessairement très-étroite d'un microscope simple, qu'il n'y a aucun doute, qu'à l'exception de quelques cas tout à fait particuliers, le microscope composé est de beaucoup la meilleure forme d'instrument, lorsque l'on doit amplifier considérablement un objet.

Microscope composé.

Si une lentille convexe est tenue à une distance convenable d'une chandelle allumée, une image renversée de la flamme peut être projetée sur un écran placé lui-même à une distance convenable. Ayant ainsi formé cette image, nous pouvons l'amplifier elle-même en la regardant à travers une autre lentille, mais il

n'est pas nécessaire pour cela que cette image soit formée sur une surface matérielle; elle existe même dans l'espace, et peut être rendue visible au moyen d'une lentille placée derrière l'image sur le trajet du faisceau de lumière. Deux lentilles simples arrangées ainsi: l'une agissant comme objectif, et l'autre comme oculaire, formeront un microscope composé rudimentaire; mais avec un tel arrangement, les aberrations de sphéricité et de chromatisme seront si grandes, que l'on ne pourra obtenir aucune vision nette et distincte; les premières formes du microscope composé ont été construites sur ce principe, mais on les a rendues moins défectueuses en superposant plusieurs lentilles les unes aux autres. Tous ces instruments étaient bien peu propres à des recherches scientifiques, et au point de perfection où nous sommes arrivés, ils ne nous semblent guère supérieurs à ces jouets à l'aide desquels on peut amplifier considérablement les dimensions d'un objet de petite taille, mais auxquels on ne peut demander ni définition un peu complète ni précision dans les détails. Les difficultés théoriques et pratiques que l'on a eu à surmonter, pour arriver de cette condition embryonnaire à la construction de nos magnifiques microscopes composés modernes, étaient si grandes que jusqu'aux cinquante ou soixante dernières années, la possibilité même du succès était mise en doute par les premières autorités en fait d'optique.

Objectifs.

Les objectifs doivent être construits de telle manière que tous les rayons lumineux provenant d'un même point, après avoir traversé les lentilles et les oculaires destinés à faire apparaître l'image, entrent, à travers la pupille de l'œil, assez parallèles entre eux pour former sur la rétine une image libre de toute espèce d'auréole ou de couleurs marginales. La réalisation de cette condition dépend du fait que la quantité dont les rayons rouges et bleus sont séparés, en passant à travers des verres d'espèces différentes, ne varie pas de la même manière que la quantité dont

ils sont déviés, ou pour employer l'expression technique, leur pouvoir dispersif varie dans des proportions autres que leur pouvoir réfractif. Il résulte de cela, que nous pouvons à volonté construire des prismes qui ne dévient pas la lumière, mais séparent les rayons constituant le spectre, ou bien des prismes qui dévient tous les rayons à peu près sous le même angle de telle manière que l'objet apparaisse libre de toute coloration. C'est cette dernière propriété qui est absolument nécessaire dans la construction des lentilles; nous avons besoin d'avoir des appareils optiques qui dévient considérablement la lumière et qui ne la décomposent pas, en réfractant inégalement les rayons rouges et bleus. Là n'est cependant pas la seule difficulté; la perfection dans la construction de l'instrument dépend aussi de ce que les différents rayons de lumière doivent être amenés au même foyer, qu'ils aient traversé le centre ou la circonférence des lentilles; sans cela il ne peut pas y avoir formation d'un foyer parfait, et l'image conserve toujours quelquechose d'indistinct. Ces difficultés d'ordre divers ont été en grande partie surmontées par l'emploi de lentilles composées, consistant ordinairement en une lentille biconvexe de *crown glass*, unie au moyen d'une couche de baume de Canada, à une lentille plano-concave de *flint glass*. Lorsque les courbures sont exactement proportionnées au pouvoir dispersif des deux espèces de verre, la réfraction inégale des deux couleurs extrêmes du spectre peut être presque absolument corrigée; mais il reste encore ce que l'on appelle la dispersion irrationnelle du verre qui rend presque impossible d'obtenir une image absolument exempte de couleurs. L'aberration de sphéricité peut être très-convenablement corrigée par une combinaison suffisante de plusieurs lentilles composées, comme celles que nous venons de décrire, de différentes tailles et différemment compensées. Toutes ces difficultés sont considérablement diminuées si l'on réduit l'ouverture des lentilles, et si l'on utilise seulement leur partie centrale; mais dans ce cas la valeur des objectifs diminue beaucoup par suite d'autres causes.

L'idéal serait d'avoir un objectif de large ouverture qu'il ne soit pas nécessaire d'approcher trop près de l'objet, et construit de telle manière que, combiné avec les oculaires, il puisse donner une image parfaitement nette et absolument incolore.

Il est si difficile d'obtenir tous ces *desiderata* quand il s'agit de grands pouvoirs grossissants, qu'en définitive les meilleurs objectifs arrivent toujours plus ou moins à un compromis entre les qualités opposées, et l'on peut se demander s'il n'y aurait pas avantage à construire les lentilles d'un très-grand pouvoir grossissant de manières différentes pour l'étude d'objets divers, suivant que l'une ou l'autre de ces qualités est d'une importance capitale. C'est ainsi, par exemple, que pour certains objets il est surtout essentiel d'obtenir une bonne définition à travers une grande épaisseur de substance, que pour d'autres il faut séparer des lignes très-fines ou discerner des intervalles dans une coupe excessivement mince, etc., etc.

Avant de terminer la question des objectifs il est bon d'attirer encore l'attention sur quelque points. Des lentilles composées à courte distance focale, convenablement corrigées pour voir un objet non recouvert, ne seront pas par cela même corrigées, si l'objet est recouvert par une lame de verre mince (verrelet). Pour faire la correction nécessaire, ces objectifs sont habituellement pourvus d'une vis de rappel à l'aide de laquelle les lentilles composées peuvent être rapprochées ou éloignées les unes des autres, tellement que l'on compense ainsi l'effet du passage des rayons lumineux à travers des verrelets de plus ou moins grande épaisseur. Par ce procédé, l'on peut aussi corriger l'effet des variations de distance entre les objectifs et les oculaires, quand on allonge ou quand on raccourcit le tube du microscope. Cette dernière méthode de faire varier le pouvoir grossissant est parfois très-commode, mais elle ne doit pas être poussée au delà de certaines limites assez restreintes, car pour être exact on devrait corriger les objectifs pour chaque distance particulière qui les sépare des oculaires. Cette distance est en général beaucoup plus courte

pour les microscopes construits sur le Continent que pour les microscopes anglais.

Quelques objectifs sont composés d'un assez grand nombre de pièces indépendantes que l'on peut employer, ou bien isolément, ou bien combinées ensemble ; le seul avantage d'un tel arrangement est de diminuer le coût de l'instrument ; mais cet avantage n'est obtenu qu'au prix de la qualité, car la correction parfaite dépend de l'action combinée de *toutes* les lentilles, et si l'on en enlève une, ou plus d'une, ce qui reste ne peut être convenablement corrigé. Mais comme d'une autre part la question du prix a sa grande importance, l'on peut employer dans certains cas ce procédé, et obtenir des résultats peut-être meilleurs que ceux qu'assurent d'autres méthodes également économiques.

Oculaires.

Les oculaires des microscopes composés consistent en deux lentilles plano-convexes ; l'une, la plus éloignée de l'œil, a pour action principale d'augmenter l'étendue du champ de la vision ; l'autre, plus près de l'œil, ayant pour effet d'amplifier encore l'image renversée, déjà agrandie par les autres lentilles. Ces deux verres jouent un très-grand rôle, en achevant de corriger les imperfections de l'objectif et en fournissant un champ visuel plat et sur le même plan. Le pouvoir amplifiant du microscope dans son ensemble dépend, pour une bonne part, de la lentille supérieure de l'oculaire ; mais en pratique la limite de ce procédé d'amplification est bien vite atteinte. Ce que l'on a trouvé de plus convenable, c'est de multiplier cette lentille supérieure de l'oculaire en superposant deux ou trois verres de pouvoirs progressifs, mais sitôt que l'on a dépassé un certain point, les avantages dus à l'augmentation du pouvoir amplifiant sont complètement effacés par la diminution dans l'éclairage et dans la netteté de la définition ; de sorte qu'en somme il est de beaucoup préférable de n'employer que des oculaires d'un faible pouvoir amplifiant, en les combinant avec des objectifs à faible distance

focale et à large ouverture. Cela, il est vrai, élève considérablement le prix de l'instrument.

Dans le but de surmonter la difficulté qui résulte du renversement de l'image, lorsque l'on veut disséquer sous un microscope composé, on emploie volontiers des lentilles redressantes qui rétablissent l'image dans la position réelle, en retournant une seconde fois l'image renversée.

Microscopes binoculaires.

L'on peut désirer d'avoir un instrument capable d'être utilisé à la fois par les deux yeux, un instrument dont le champ visuel soit complet pour chacun des deux tubes, dont le pouvoir de définition soit intact, et construit de manière à ce que toute la lumière soit envoyée à volonté dans un seul des deux tubes, et que ce tube puisse être employé comme un microscope monoculaire ordinaire; mais en pratique il est très-difficile, si ce n'est pas impossible, de combiner toutes ces qualités dans le même instrument, et l'on en est ordinairement réduit à sacrifier l'une ou l'autre de ces qualités, en suivant en cela les besoins de l'observateur et les nécessités du travail dans lequel il est engagé. Après avoir passé à travers l'objectif, le faisceau lumineux est divisé en deux moitiés : un prisme réfléchit une partie de la lumière dans un tube oblique, tandis que l'autre partié passant à côté du prisme arrive directement dans l'autre tube. Dans d'autres instruments, le faisceau est divisé par deux prismes qui dirigent les images dans deux tubes inclinés l'un et l'autre. Cette dernière combinaison présente certains avantages, mais elle fait perdre la possibilité de convertir l'instrument en un microscope monoculaire. Le grand mérite des instruments binoculaires consiste en ce que les yeux se fatiguent moins et que les différences de niveau des diverses parties d'un objet apparaissent plus facilement qu'avec le microscope monoculaire. Des objets solides éclairés par la lumière directe montrent un relief remarquable, et même s'il s'agit de coupes égales faites dans des substances transparentes, la structure générale et le

différences de plan apparaissent beaucoup plus facilement et sont mieux comprises que lorsqu'on ne regarde qu'avec un seul œil. Enfin il est moins fatigant pour l'organe visuel d'employer à la fois les deux yeux; lorsque l'on n'emploie qu'un seul œil, celui qui est mis en jeu souffre d'un excès de travail, l'autre d'un défaut de travail; il y a un trop grand contraste entre le jeu habituel des yeux qui se combinent pour voir les objets ordinaires, et la pratique du microscope ou un seul œil est mis en action. Mais s'il s'agit de grands pouvoirs amplifiants, ces avantages sont plus que balancés par la diminution dans l'éclairage et dans la netteté de la définition sur une grande partie du champ visuel; c'est pourquoi il est très-important de pouvoir à volonté, dans le microscope binoculaire, écarter l'effet du prisme et le transformer en un microscope monoculaire, selon les exigences de l'observation. Lorsque la question d'argent doit entrer en ligne de compte, et pour certains genres de travail, il vaut mieux abandonner les commodités du microscope binoculaire pour s'assurer d'autres avantages plus importants.

Pied et Corps du Microscope.

Une des conditions les plus importantes du microscope est que ses mouvements affectent également l'objectif et l'objet; si l'une de ces parties peut se mouvoir le moins du monde indépendamment de l'autre, une trépidation légère et inévitable viendra déranger l'observation, lorsque l'on usera de pouvoirs amplifiants considérables. La possibilité de faire certains mouvements est essentielle, ou du moins très-désirable, mais le mécanisme de ces mouvements doit être assez soigneusement construit pour que, même après un usage prolongé, il n'y ait pas de jeu dans les pièces, et qu'une trépidation ne vienne pas troubler l'observation. Il vaut mieux ne pas introduire des mouvements qui ne sont pas absolument nécessaires, plutôt que d'avoir un mécanisme qui ne les exécute pas parfaitement bien. Un instrument très-compliqué, mais grossièrement construit, ne sera pas d'un bon usage en pra-

tique et l'on peut formuler la loi générale, que les instruments bon marché doivent être simples. En admettant que le mécanisme puisse être construit avec la perfection désirable, on trouvera avantage à ce que le tube du microscope puisse, non-seulement être soulevé ou abaissé rapidement de quantités considérables, ou bien puisse être accommodé avec la plus grande précision à la distance focale des grands pouvoirs grossissants, mais encore que l'instrument présente la possibilité d'être employé, soit verticalement, soit horizontalement, soit incliné suivant un angle quelconque. La position verticale n'est pas seulement malcommode, mais elle est encore la plus mauvaise pour obtenir une définition correcte.

Éclairage.

Un éclairage convenable des objets est de la plus grande importance, et tel système approprié à une classe de microscopes ne serait pas applicable à une autre. Quoiqu'il n'y ait pas de ligne exacte de démarcation entre ces systèmes, je crois convenable de diviser les méthodes d'éclairage en trois groupes principaux: l'éclairage par lumière réfléchie, l'éclairage par lumière transmise, et l'éclairage par lumière réfractée.

Pour des objets opaques, la lumière réfléchie est la seule admissible, et même lorsque l'objet est suffisamment transparent pour permettre l'usage de la lumière transmise, il arrive souvent que quelques détails se voient parfois mieux au moyen de la lumière réfléchie sur la surface. Excepté pour des pouvoirs grossissants très-faibles, la surface à observer doit être rendue suffisamment brillante, en concentrant sur elle la lumière, soit au moyen de lentilles convergentes, soit au moyen de miroirs argentés concaves. Ces derniers ont l'avantage de donner des ombres portées qui paraissent être du bon côté, et lorsqu'ils sont de forme parabolique, et placés de telle manière que leur foyer coïncide avec celui de l'objectif, l'éclairage est véritablement excellent pour beaucoup d'objets. Le système de Lieberkühn diffère de celui que nous venons de décrire en ce qu'il réfléchit sur l'objet, non pas la

lumière qui lui arrive de côté, à angle droit de l'axe de l'instrument, mais celle qui passe de chaque côté dans la ligne de l'axe. Ce système ne peut pas être employé avec des objets trop grands, et d'une manière générale, il est nécessaire de placer sous l'objet un écran de couleur sombre pour empêcher l'entrée des rayons directs dans l'instrument; de plus, ces miroirs projettent la lumière de tous les côtés, de telle manière qu'ils ne peuvent pas donner naissance à des ombres bien marquées, dont la formation est pourtant désirable. Aucun de ces réflecteurs ne peut être employé avec de grands pouvoirs grossissants; pour ces derniers on a construit des *illuminateurs*, consistant en une lame de verre mince placée au dessus de l'objectif, réfléchissant la lumière vers le bas à travers les lentilles, lesquelles condensent cette lumière sur l'objet, en même temps qu'elles renvoient à l'œil, à travers la lame de verre, l'image de l'objet qu'on observe. Malgré tout cela, l'insuffisance de la lumière reste toujours le grand obstacle à l'emploi des forts grossissements avec la lumière réfléchie, et cependant ce mode d'éclairage a bien ses avantages, et nous permet de voir des objets et des détails de structure qui sans lui resteraient invisibles.

La possibilité de distinguer des objets à la lumière transmise dépend de leur pouvoir d'absorber ou de réfléchir cette lumière de telle manière qu'il se développe dans la préparation des lignes ou des contours plus ou moins bien marqués. La moitié des qualités d'un microscope peuvent être perdues, si l'on n'a pas soin d'éclairer chaque espèce d'objet de la manière convenable. Pour des grossissements relativement faibles l'on peut se contenter d'un miroir plat ou concave pour réfléchir la lumière, mais pour de forts grossissements il est indispensable que la lumière soit concentrée au moyen d'un condensateur achromatique, adapté de telle manière que les rayons de lumière passant autour de l'objet examiné soient. dans les mêmes conditions que ceux qui traversent l'objet lui-même. Pour la séparation de lignes très-rapprochées, à l'aide de très-forts grossissements, il est important que l'angle de divergence des rayons qui viennent du condensateur

soit à peu près égal à celui qui peut passer à travers l'objectif, mais ne soit pas plus grand que celui-ci ; ou en d'autres termes, que l'angle d'ouverture des deux séries de lentilles soit à peu près égal, quoique en même temps il doive y avoir moyen de modifier cet angle à l'aide d'un diaphragme tournant. Lorsque l'on n'emploie que des grossissements faibles, un diaphragme à large ouverture placé sous la table est suffisant, même sans condensateur. Une largeur d'ouverture, qui dans certains cas est absolument nécessaire pour faire voir tel détail de structure, laisse d'autres détails complètement invisibles. On peut en dire à peu près autant du diaphragme qu'on appelle *iris*, ou des diaphragmes avec des trous de différentes grandeurs placés au dessous de la table, que l'on emploie sans condensateur, pour limiter la largeur du rayon de lumière qui doit éclairer l'objet.

Dans certains cas, il y a lieu d'employer de la lumière transmise assez obliquement à la partie inférieure de l'objet, pour que le champ du microscope soit absolument obscur lorsque la préparation est enlevée. Avec un tel procédé d'illumination, la structure de l'objet est mise en évidence par de la lumière réfractée irrégulièrement, ou tellement réfléchie que sa course est déviée de sa direction primitivement oblique, pour être ramenée dans l'axe de l'instrument. Ce mode d'éclairage par réfraction peut être obtenu en projetant la lumière à l'aide d'un miroir ordinaire, placé obliquement, ou bien en le déviant à l'aide d'un prisme, ou bien au moyen d'une lentille ou d'un réflecteur parabolique avec un écran central. Les deux derniers systèmes donnent un éclairage arrivant de divers côtés, tandis que le premier procure un éclairage uni-latéral. Chacun de ces systèmes a ses avantages particuliers.

En général, la meilleure lumière est celle qui est réfléchie par un nuage blanc, mais comme on ne peut pas toujours en avoir à sa disposition, on a recours pour y suppléer à des lampes de différents systèmes. La seule condition qu'on a à leur demander est qu'elles donnent une flamme large, blanche, immobile et de dimensions modérées. On peut facilement rendre parallèles les

rayons qui doivent être projetés sur le miroir du microscope au moyen d'un condensateur en œil de bœuf, placé de telle manière que la flamme soit à peu près à son foyer.

APPAREILS ACCESSOIRES.

Outre ces parties du microscope, qui sont plus ou moins indispensables pour l'étude de toutes les classes d'objets, il y a quelques appareils accessoires, dont l'emploi n'est nécessité que pour quelque but spécial et déterminé. Parmi ces appareils nous pouvons citer les micromètres, soit qu'on les place sur la table du microscope, soit qu'on les insère dans l'une des pièces de l'oculaire. Ce sont des lames de verre sur lesquelles on trace avec un diamant des lignes, à des distances régulières, mais excessivement rapprochées. Ces micromètres servent à déterminer la grandeur naturelle des objets que l'on voit sous le microscope, et dans certains cas, cette détermination peut avoir une grande importance.

Citons encore les capsules (*live boxes*) pour étudier les animalcules contenus dans l'eau, et les compresseurs, destinés à appliquer une pression plus ou moins forte sur les tissus. Pour fixer les insectes ou autres petits objets on emploie différentes espèces de pinces, construites de telle sorte, que l'on puisse tourner l'objet a étudier dans diverses positions. Ce que l'on peut appeler un chercheur (*finder*) est très-utile, en permettant de renvoyer à volonté telle partie déterminée d'un objet déjà étudié. Une chambre claire placée au dessus de l'oculaire sert à faire les dessins microscopiques.

APPAREILS À POLARISATION, ETC.

Certains minéraux, certaines roches et même quelques corps organiques doivent pour leur étude être soumis à l'action de la lumière polarisée; dans ce but, on fixe un polariseur au dessous et un analyseur au dessus de l'objet; l'analyseur est en général fixé au dessus de l'oculaire, mais si l'on tient à employer un microscope binoculaire, on le fixe au dessus de l'objectif. Des lames de

sélénite servent à renforcer ou à diminuer les teintes lumineuses causées par l'action de l'objet qu'on examine, et à déterminer si la double réfraction est positive ou négative. Un prisme à double image placé sur l'oculaire, et une lame avec un trou circulaire insérée dans l'oculaire lui-même, sont très-utiles pour étudier le dichroïsme des minéraux. Un goniomètre à prisme à double image peut être utilisé avec avantage pour mesurer les angles de petits cristaux.

Appareils employés pour la Préparation d'Objets microscopiques.

La plupart des petits instruments employés pour la préparation microscopique n'ont rien de caractéristique ni de spécial; il faut cependant signaler les différentes formes d'instruments employés pour diviser en coupes minces les bois et autres substances analogues qui sont assez dures pour être tranchées avec un rasoir aiguisé; ou encore les appareils à l'aide desquels on arrive à congeler des tissus animaux trop tendres et à en faire des coupes lorsqu'ils sont gelés. Des petits tours et des roues servent à couper, à user et à polir les coupes minces de roches, minéraux, fossiles, coquilles, os et autres substances plus ou moins dures et friables. Ces appareils peuvent épargner le temps et le matériel, mais ils sont loin d'être indispensables, car l'on peut faire les plus belles coupes dures en tenant l'objet simplement à la main, en l'usant sur des plaques métalliques avec de l'émeri grossier d'abord, puis fin ensuite, et en achevant de le polir sur des pierres de plus en plus fines.

Appareils Spectroscopiques.

L'étude de la nature intime de la lumière transmise ou réfléchie par des substances colorées, que la physique moderne nous a appris à faire au moyen de l'analyse spectrale, a nécessité l'invention de nouveaux appareils spéciaux. L'analyse de la lumière est effectuée, ou bien au moyen d'un oculaire spectroscopique dont

la fente est placée au foyer d'une lentille achromatique sur laquelle on place un prisme composé à vision directe; ou bien au moyen d'appareils dont la fente est située au foyer de l'objectif: le premier système est le plus convenable pour l'étude de très-petits objets qu'il faut examiner avec de forts grossissements, tandis que l'autre appareil, qui est placé au dessous d'un objectif à long pouvoir focal, est plus convenable pour étudier avec un microscope binoculaire le spectre de liquides renfermés dans de petites capsules de verre; ce même appareil pourra servir pour étudier des objets relativement assez gros, qui n'ont pas moins d'un huitième de pouce (3^{mm}) de diamètre. Dans les deux formes d'appareils on peut arriver à comparer les spectres de deux objets différents en les plaçant l'un à côté de l'autre. Cette disposition est très-importante, quoiqu'elle ait été négligée dans la construction de quelques-uns de ces appareils. Pour perfectionner encore ces appareils spectroscopiques, on a su ajouter certaines dispositions accessoires pour permettre à l'observateur de mesurer exactement la position d'une partie déterminée du spectre et pour établir la longueur des ondes de la lumière.

H. C. SORBY.

LONDRES: IMPRIMERIE DE VIRTUE ET CIE., (LIMITED), CITY ROAD.

